

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин**

# **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Учебно-методическое пособие

Издательство  
Томского политехнического университета  
2010

УДК 62-83 (075.8)  
ББК 31 271Я73  
Ч–496

**Ч–496 Качин С.И.** Автоматизированный электропривод: учебно-методическое пособие / С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 162 с.

В учебно-методическом пособии рассмотрены вопросы выбора двигателя по мощности и последовательность расчета статических и динамических характеристик электроприводов постоянного и переменного тока с релейно-контакторным управлением при пуске, регулировании скорости и торможении; представлены методика и примеры расчета параметров якорной цепи двигателей постоянного тока и схемы замещения асинхронных двигателей.

Пособие подготовлено на кафедре Электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета и предназначено для студентов дневной формы обучения, обучающихся по направлениям 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и 140200 «Электроэнергетика».

**УДК 62-83 (075.8)**  
**ББК 31.291Я73**

#### *Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор кафедры конструирования  
электронно-вычислительной аппаратуры ТУСУР  
*В.А. Бейнарович*

Кандидат технических наук, доцент кафедры электроники  
и автоматики физических установок СГТА  
*В.Б. Терехин*

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 2010  
© С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин, 2010  
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2010

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Целью данной курсовой работы является закрепление и систематизация знаний по автоматизированному электроприводу, развитие навыков самостоятельной работы с использованием специальной технической литературы.

Курсовая работа выполняется по нескольким темам с индивидуальными заданиями для каждого студента. Исходными данными для курсовой работы являются диаграммы скорости и нагрузочные диаграммы производственных механизмов, сведения о технологических процессах, показатели производительности, кинематика механизмов.

Курсовая работа состоит из расчетно-пояснительной записки на 20–25 страницах машинописного текста, включающей графический материал. Оформление пояснительной записки и чертежей должно соответствовать требованиям стандарта предприятия СТП ТПУ 2.5.01–99.

**РАБОТЫ ВЫПУСКНЫЕ КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ, ПРОЕКТЫ И РАБОТЫ КУРСОВЫЕ.**

## 2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Расчетно-пояснительная записка к курсовой работе состоит из следующих разделов:

- титульный лист;
- задание на курсовую работу;
- содержание;
- введение;
- основная часть с разбивкой по разделам;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

### *Общие требования.*

Текстовый документ курсовой работы должен быть выполнен на русском языке в соответствии с ГОСТ 7.32. ТД.

### *Титульный лист.*

Форма титульного листа и образец его заполнения приведены в Приложении 8.

### *Техническое задание.*

Курсовая работа должна выполняться на основе индивидуального задания, содержащего требуемые решения поставленных задач, исходные данные. Форма задания заполняется рукописным или машинописным способом.

### *Содержание.*

Содержание должно отражать все материалы, представляемые к защите работы. Слово «Содержание» записывают в виде заголовка, симметрично тексту, прописными буквами. В содержании дается перечень рассмотренных вопросов с указанием страниц записки, на которых они начинаются.

### *Введение.*

В разделе «Введение» кратко формулируются цель и задачи курсовой работы, указываются особенности, техническое и практическое значение, основные направления предлагаемых решений.

Во введении следует раскрыть актуальность вопросов темы, охарактеризовать проблему, к которой относится тема, перечислить методы и средства, с помощью которых будут решаться поставленные задачи.

### *Основная (расчетная) часть работы включает следующие вопросы:*

- Выбор типа электропривода.
- Расчет мощности электродвигателя и предварительный его выбор, определение оптимального по условию минимизации времени пуска передаточного отношения редуктора.

- Расчет механических и электромеханических характеристик для двигательного и тормозного режимов.
- Расчет и выбор пусковых, тормозных и регулировочных сопротивлений.
- Расчет переходных характеристик –  $I = f(t)$ ,  $M = f(t)$  и  $\omega = f(t)$  – за цикл работы.
- Построение нагрузочной диаграммы электропривода.
- Проверка выбранного электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности.
- Разработка и составление принципиальной электрической схемы силовой цепи электропривода и системы управления.

#### *Заключение.*

В заключении сообщаются основные результаты выполненной работы, рекомендации по использованию результатов работы.

#### *Список использованных источников.*

В список использованных источников включаются лишь непосредственно использованные источники. В список включают все источники, на которые имеется ссылки в текстовом документе. Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте арабскими цифрами.

#### *Приложения.*

В приложения следует включать материалы вспомогательного характера. В приложения могут быть помещены:

- таблицы и рисунки большого формата;
- дополнительные расчеты;
- распечатки с персонального компьютера.

На все приложения в тексте должны быть ссылки. Каждое приложение должно начинаться с нового листа. Наверху, посередине листа, печатают слово «Приложение» и его буквенное обозначение, начиная с 1.

*Графическая часть* курсовой работы состоит из 2–4 листов демонстрационного материала формата А4. Графическая часть выполняется с применением персонального компьютера и должна включать следующие разделы:

- кинематическую схему;
- диаграммы скорости и момента производственного механизма;
- принципиальную схему силовой цепи электропривода и системы управления;
- механические и электромеханические характеристики электропривода за цикл работы;
- кривые переходных процессов.

### 3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ДОКУМЕНТА

Требования к оформлению технического документа (ТД):

- ТД должен быть выполнен на белой бумаге формата А4 (210×297) с одной стороны листа с применением печатающих или графических устройств вывода персонального компьютера. Межстрочный интервал – одинарный, размер шрифта – 14 пунктов. Используемый шрифт – Times New Roman;

- иллюстрации, таблицы и распечатки с персонального компьютера допускается выполнять на листах формата А3, при этом они должны быть сложены по ГОСТ 2.501;

- текст ТД следует выполнять, соблюдая следующие размеры полей: верхнее – 28 мм, нижнее – 30 мм, правое – 28 мм, левое – 28 мм;

- абзацы в тексте начинают отступом, равным 1,25 см;

- при расчетах сначала записываются формулы в общем виде, затем подставляются численные значения параметров и указывается окончательный результат с соответствующей размерностью;

- при наборе формул использовать *Редактор формул*. Формулы набираются тем же размером шрифта, что и основной текст, без жирного выделения. Буквы латинского алфавита обозначают *курсивом*. Буквы греческого, русского алфавита и цифровые обозначения набирают шрифтом обычного (прямого) начертания. Рекомендуются следующие размеры элементов формул: обычный – 14 пт., крупный индекс – 12 пт., мелкий индекс – 11 пт., крупный символ – 18 пт., мелкий символ 12 пт.;

- к переменным из формул, если они используются в основном тексте, применяются правила написания для формул);

- все расчеты графиков должны производиться с применением прикладных программ: MathCAD, Matlab, Excel и др. и иллюстрироваться графиками с соответствующими ссылками в тексте;

- в исключительных случаях, когда вычисления производятся по «точкам», результаты расчета кривых сводятся в таблицы и также должны быть проиллюстрированы графиками с соответствующими ссылками в тексте;

- все выполняемые расчеты и их результаты должны сопровождаться краткими комментариями и пояснениями;

- рисунки и иллюстрации в расчетно-пояснительной записке должны выполняться с применением средств оргтехники на белой бумаге формата, установленного ГОСТ 2.301–68;

- рисунки и иллюстрации нумеруют для того, чтобы на них было удобно ссылаться в тексте. Условное обозначение иллюстрации – слово «рис.», чтобы отличить номера иллюстраций от других номеров. Подрисуночные подписи необходимо выполнять шрифтом 13 пунктов;

- номер иллюстрации: Рис. 1. Нумерация может быть сквозной (Рис. 1., Рис. 2., Рис. 3) или индексационной (например, для первой главы: Рис. 1.1, Рис. 1.2, Рис. 1.3);

- таблицы в тексте нумеруют. Для того чтобы упростить связь таблицы с текстом, ссылку на таблицу необходимо выполнять так: табл. 1 или табл. 1.1. Нумерация таблиц может быть также сквозной или индексационной;

- каждый раздел ТД рекомендуется начинать с нового листа. Разделы должны иметь порядковые номера в пределах ТД, обозначенные арабскими цифрами и записанные с абзацного отступа. Подразделы и пункты должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела или подраздела.

## 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

### 4.1. Расчет моментов нагрузки и моментов инерции производственного механизма

Расчет моментов нагрузки и моментов инерции производственного механизма выполняется на основе конструктивных и технологических данных машины, указываемых в задании. Моменты нагрузки и моменты инерции движущихся масс механизма приводятся к валу двигателя с учетом передаточного отношения и КПД редуктора.

По рассчитанным приведенным статическим нагрузкам на валу двигателя и заданном времени рабочего цикла строится нагрузочная диаграмма.

В ряде случаев диаграммы скорости и момента производственного механизма могут быть рассчитаны заранее и представлены, например, в виде таблиц в задании на курсовую работу. В этом случае тахограмма и нагрузочная диаграмма строятся по данным технического задания рис. 4.1.

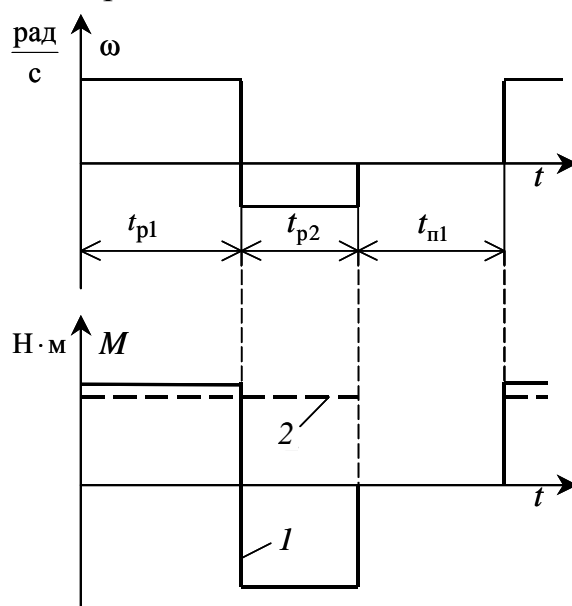


Рис. 4.1. Тахограмма и нагрузочная диаграмма производственного механизма: 1 – реактивная нагрузка; 2 – активная нагрузка

Если в техническом задании приводится частота вращения  $n_i$  производственного механизма, то она пересчитывается на угловую скорость в соответствии с выражением:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (4.1)$$



где  $n_i$  – частота вращения производственного механизма на  $i$ -м интервале времени,  $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

## 4.2. Выбор типа электропривода

Выбор рода тока, типа и конструктивного исполнения двигателя основывается на анализе технологических требований и условий работы производственного механизма. Основными факторами, определяющими род тока, тип и конструктивное исполнение двигателя, являются:

- показатель регулирования скорости (диапазон, плавность, стабильность скорости и т. д.);
- режим работы производственного механизма;
- производительность и надежность установки;
- основные затраты и эксплуатационные расходы на электрооборудование.

При рабочем проектировании обычно выполняется технико-экономическое сравнение различных вариантов электропривода. В данной работе тип электропривода выбирается без расчета технико-экономических показателей на основании общих соображений о преимуществах и недостатках того или иного варианта применительно к условиям задания. При этом обязательно учитываются первые два пункта основных факторов.

Для учебной курсовой работы в качестве основного способа регулирования скорости следует выбирать реостатный – как наиболее простой при разработке системы управления. По согласованию с руководителем курсовой работы способ регулирования скорости может быть изменен.

После определения способа регулирования скорости необходимо в осях координат ( $\omega$ ,  $M$ ) изобразить рабочие точки установившихся режимов работы механизма с координатами  $\omega_i$ ,  $M_i$  (рис. 4.2).

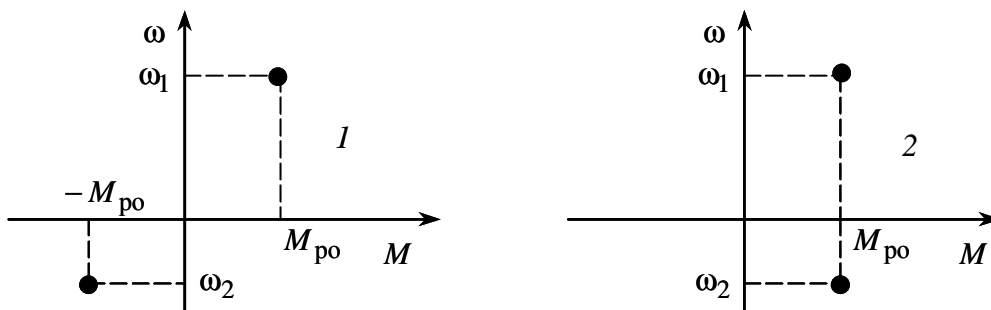


Рис. 4.2. Координаты установившихся скоростей работы механизма:  
 1 – реактивная нагрузка; 2 – активная нагрузка

Определить режим работы электропривода для каждой из заданных скоростей  $\omega_i$  работы механизма: двигательный режим, режим рекуперативного торможения, режим динамического торможения, режим торможения противовключением. Эскизно изобразить механические характеристики двигателя, приведенные к валу механизма. На рис. 4.3 в качестве примера изображены механические характеристики асинхронного двигателя, приведенные к валу механизма.

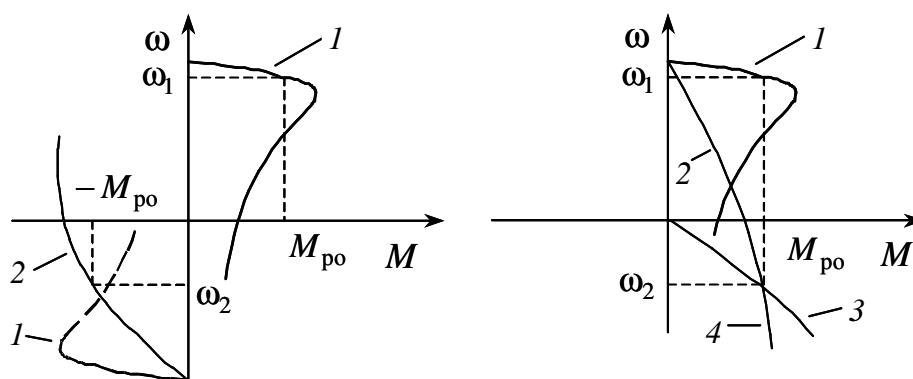


Рис. 4.3. Механические характеристики двигателя, приведенные к валу исполнительного механизма: 1 – естественная характеристика; 2 – реостатная характеристика, двигательный режим; 3 – характеристика режима динамического торможения; 4 – реостатная характеристика режима торможения противовключением

Определившись с методами регулирования скорости и режимами работы на регулировочных характеристиках, можно приступить к проектированию электропривода.

### 4.3. Предварительный выбор двигателя по мощности

Диаграммы скорости и момента производственного механизма, определенные в п. 4.1, обуславливают различные режимы работы электроприводов. Для более точных расчетов и выбора двигателей по мощности полученные нагрузочные диаграммы приводятся к диаграммам, которые классифицируются на восемь номинальных режимов: продолжительный режим работы (S1); кратковременный режим работы (S2); повторно-кратковременный режим работы (S3); повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками (S4); повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением (S5); перемежающийся режим работы (S6); перемежающийся режим работы с частыми реверсами (S7); перемежающийся режим работы с двумя или более угловыми скоростями (S8) [1, 2].

Для повторно-кратковременных (S3–S5) и перемежающихся режимов (S6–S8) работы электродвигателя последовательность выбора двигателя по мощности следующая:

По нагрузочной диаграмме механизма (нагрузки отнесены к валу механизма) определяется среднеквадратичное значение мощности за время работы с помощью формулы [1]:

$$P_э = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( \frac{P_i \cdot \omega_{\max}}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{pi}}}, \text{ кВт}, \quad (4.2)$$

где  $m$  – число рабочих участков в цикле;

$P_i$  – мощность на  $i$ -м интервале;

$t_{pi}$  – продолжительность  $i$ -го интервала;

$\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -м интервале, соответствующий значению угловой скорости  $\omega_i$  на этом интервале;

$\omega_{\max}$  – максимальная скорость производственного механизма.

При найденных в п. 4.1 угловых скоростях  $\omega_i$  и моментах  $M_i$  производственного механизма мощность

$$P_i = M_i \cdot \omega_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}. \quad (4.3)$$

Приближенно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной [1]:

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{\max}}, \quad (4.4)$$

где  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе).

Примерные значения коэффициента  $\beta_0$  для двигателей различного исполнения приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Исполнение двигателя	$\beta_0$
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ÷ 0,98
Закрытый самовентилируемый	0,45 ÷ 0,55
Самовентилируемый защищенный	0,25 ÷ 0,35

Находится расчетная продолжительность включения:

$$ПВ_{расч} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{j=1}^n t_{пj}} 100 \% , \quad (4.5)$$

где  $t_{pi}$  – продолжительность  $i$ -го интервала времени работы в цикле;

$m$  – число рабочих интервалов в цикле;

$t_{пj}$  – продолжительность  $j$ -го интервала времени паузы в цикле;

$n$  – число пауз в цикле.

Пересчитывается среднеквадратичная мощность на ближайшую каталожную продолжительность включения:

$$P_k = P_{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{расч}}{ПВ_k}}, \text{ кВт} , \quad (4.6)$$

где  $ПВ_k$  – ближайшая к расчетной каталожная продолжительность включения. Каталожная продолжительность включения выбирается из ряда номинальных значений: 15 %, 25 %, 40 %, 60 %, 100 %.

По полученному значению мощности и максимальной угловой скорости вращения механизма определяется расчетная мощность двигателя:

$$P_{расч} = P_k \cdot \frac{k_3}{\eta_{п}}, \text{ кВт} , \quad (4.7)$$

где  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент запаса, учитывающий отличие нагрузочной диаграммы двигателя от диаграммы механизма. Большие значения  $k_3$  соответствуют большим изменениям угловой скорости;

$\eta_{п}$  – коэффициент полезного действия передачи.

По каталогу выбирается несколько электродвигателей **ближайшей большей** мощности с различными номинальными частотами вращения.

Для каждого двигателя вычисляется расчетное передаточное отношение (число) редуктора (например, для редуктора при регулировании скорости вниз от номинальной и реактивной нагрузки):

$$i_{pi} = \frac{\omega_{нд}}{|\omega_{max м}|}, \quad (4.8)$$

где  $\omega_{нд}$  – номинальная скорость двигателя;

$\omega_{max м}$  – максимальная скорость производственного механизма.

Промышленность выпускает одно-, двух- и трехступенчатые редукторы с передаточным числом из стандартного ряда [3]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,1; 8,0; 9,0.

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора можно найти следующим образом:

$$i_{\text{ст } pi} = i_{\text{ст } i} \cdot 10^x, \quad (4.9)$$

где  $i_{\text{ст } i}$  – стандартное передаточное число редуктора;

$x$  – целое число.

Например, стандартными передаточными отношениями являются числа: 1,12; 11,2; 112 и т. д.

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается из ряда как **ближайшее меньшее** к расчетному по (4.8):

$$i_{\text{ст } pi} \leq i_{pi}. \quad (4.10)$$

Для каждого двигателя определяется оптимальное, по условию минимизации времени пуска, передаточное отношение редуктора:

$$i_{\text{опт } i} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{k \cdot J_{\text{дв}}}}, \quad (4.11)$$

где  $J_{\text{м}}$  – момент инерции производственного механизма;

$J_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора двигателя;

$k = 1,05 \div 1,3$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора.

Для каждого двигателя определяется отношение выбранного стандартного передаточного отношения редуктора к оптимальному передаточному отношению:

$$\Theta = \frac{i_{\text{ст } pi}}{i_{\text{опт } i}}. \quad (4.12)$$

Двигатель с  $\Theta$ , наиболее приближенной к единице, принимается в качестве приводного.

#### **4.4. Определение параметров двигателя по каталожным данным**

##### **4.4.1. Определение параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения**

В каталогах [4, 5] на двигатели постоянного тока приводятся следующие технические данные:

$P_{\text{н}}$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_H$  – номинальное напряжение, В;

$I_H$  – номинальный ток двигателя, А;

$R_{яд}$  – сопротивление обмотки якоря двигателя при 15 °С, Ом;

$R_{дп}$  – сопротивление добавочных полюсов двигателя при 15 °С, Ом;

$L_{дв}$  – индуктивность цепи обмотки якоря двигателя, Гн;

$\eta_H$  – номинальный коэффициент полезного действия двигателя, %;

$n_H$  – номинальная частота вращения,  $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$ ;

$J_{дв}$  – момент инерции двигателя,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ .

В тех случаях, когда в каталогах параметры двигателя не приводятся, их ориентировочно определяют по следующим формулам:

Сопротивление цепи обмотки якоря [6]:

$$R_{дв} = (R_{яд} + R_{дп}) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\eta_H}{100}\right) \cdot \frac{U_H}{I_H}, \text{ Ом.} \quad (4.13)$$

Сопротивление обмотки якоря горячее при температуре двигателя, равной 75 °С:

$$R_{дв.гор} = 1,24 \cdot R_{дв}, \text{ Ом.} \quad (4.14)$$

Индуктивность цепи обмотки якоря двигателя [6]:

$$L_{дв} = k \cdot \frac{U_H}{2 \cdot p \cdot n_H \cdot I_H}, \text{ Гн,} \quad (4.15)$$

где  $p$  – число пар полюсов двигателя;

$k = 6 \div 8$  – для быстроходных некомпенсированных машин;

$k = 8 \div 12$  – для нормальных некомпенсированных машин;

$k = 5 \div 6$  – для компенсированных машин.

Коэффициент ЭДС и электромагнитного момента:

$$c = \frac{U_H - I_H \cdot R_{дв.гор}}{\omega_H}, \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}, \quad (4.16)$$

где  $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$  – номинальная угловая скорость двигателя,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Номинальный электромагнитный момент двигателя:

$$M_H = c \cdot I_H, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (4.17)$$

Номинальный момент двигателя на валу:

$$M_{двн} = \frac{1000 \cdot P_H}{\omega_H}, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (4.18)$$

#### 4.4.2. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным

В наиболее полных справочниках [7] по асинхронным двигателям приведены следующие физические величины, необходимые для определения параметров его схемы замещения:

$P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$\eta_H$  – коэффициент полезного действия электродвигателя в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка), %;

$\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка), о. е.;

$R_1'$  – активное сопротивление обмотки статора, о. е.;

$X_{1\sigma}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, о. е.;

$R_2''$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о. е.;

$X_{2\sigma}''$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о. е.;

$X_m'$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление), о. е.

В этом случае нахождение параметров схемы замещения асинхронного двигателя не представляет сколько-нибудь заметных трудностей и выполняется в следующей последовательности.

Определяется номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H}. \quad (4.19)$$

Вычисляется базисное сопротивление:

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}. \quad (4.20)$$

Находятся параметры схемы замещения двигателя в физических величинах:

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = R_1' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (4.21)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора:

$$X_{1\sigma} = X'_{1\sigma} \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (4.22)$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2' = R_2'' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (4.23)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma}'' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (4.24)$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_m' = X_m' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (4.25)$$

Найденные параметры схемы замещения позволяют рассчитать статические характеристики асинхронного двигателя, например по формуле Клосса, т. е. без учета насыщения зубцов от полей рассеяния и вытеснения тока в стержнях беличьей клетки.

**Пример 4.1.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6У3 определить параметры Т-образной схемы замещения. Двигатель имеет следующие технические данные [7]:

- номинальная мощность двигателя  $P_H = 4$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1H} = 220$  В;
- коэффициент полезного действия электродвигателя в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка)  $\eta_H = 82,0$  %;
- коэффициент мощности в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка)  $\cos \varphi_H = 0,81$  о. е.;
- активное сопротивление обмотки статора  $R_1' = 0,077$  о. е.;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $X_{1\sigma}' = 0,073$  о. е.;
- активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,  $R_2'' = 0,062$  о. е.;
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,  $X_{2\sigma}'' = 0,11$  о. е.;
- индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление)  $X_m' = 2,0$  о. е.



*Решение*

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,82} = 9,125 \text{ А.}$$

Базисное сопротивление:

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}} = \frac{220}{9,125} = 24,1 \text{ о. е.}$$

Параметры схемы замещения двигателя в физических величинах:

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = R_1' \cdot Z_{\sigma} = 0,077 \cdot 24,1 = 1,856 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора:

$$X_{1\sigma} = X_{1\sigma}' \cdot Z_{\sigma} = 0,073 \cdot 24,1 = 1,759 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2' = R_2'' \cdot Z_{\sigma} = 0,062 \cdot 24,1 = 1,494 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma}'' \cdot Z_{\sigma} = 0,11 \cdot 24,1 = 2,651 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_m = X_m' \cdot Z_{\sigma} = 2,0 \cdot 24,1 = 48,2 \text{ Ом.}$$

#### **4.4.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным**

Как правило, в каталогах [4] на асинхронные двигатели приводятся следующие технические данные:

$P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$I_{1H}$  – номинальный ток статора двигателя, А;

$n_H$  – номинальная частота вращения, об/мин;

$S_H$  – номинальное скольжение, о. е.;

$\eta_H$  – коэффициент полезного действия электродвигателя в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка), %;

$\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о. е.;

$k_i = \frac{I_{II}}{I_H}$  – кратность пускового тока, о. е.;

$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{H}}$  – кратность пускового момента, о. е.;

$k_{\max} = \frac{M_{\text{кр}}}{M_{H}}$  – кратность максимального момента, о. е.;

$k_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_{H}}$  – кратность минимального момента, о. е.

Эти данные позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

1) магнитные и механические потери в двигателе составляют  $0,02 \cdot P_{H}$ ;

2) активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т. е. эффекты вытеснения тока не учитываются.

Определяется ток холостого хода асинхронного двигателя [8]:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H}(1 - s_H)/(1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_*(1 - s_H)/(1 - p_* s_H)]^2}}, \quad (4.26)$$

где  $I_{1H}$  – номинальный ток статора двигателя, А;

$s_H = (n_0 - n_H)/n_0$  – номинальное скольжение, о. е.;

$n_0$  – синхронная частота вращения, об/мин;

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} \quad (4.27)$$

– ток статора двигателя при частичной нагрузке, А;

$\cos \varphi_{p_*}$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке, о. е.;

$\eta_{p_*}$  – КПД электродвигателя при частичной нагрузке, о. е.;

$p_* = P/P_H$  – коэффициент нагрузки двигателя, о. е.;

$P$  – мощность двигателя при частичной нагрузке, кВт.

Коэффициенты мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин такие данные в справочной литературе отсутствуют. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10÷15 % меньше номинальной [4]. Двигатели рассчитываются так потому, что боль-

шинство из них, в силу стандартной дискретной шкалы мощностей, работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке  $p_* = 0,75$  практически равны между собой, т. е.

$$\eta_H \approx \eta_{0,75};$$

- коэффициент мощности при той же нагрузке ( $p_* = 0,75$ ) сильно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведенной на рис. 4.4.

Из формулы Клосса определим выражение для расчета критического скольжения:

$$s_K = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{(k_{\max})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)}, \quad (4.28)$$

где 
$$\beta = R_1 / (C_1 \cdot R_2'); \quad (4.29)$$

$$C_1 = 1 + [I_0 / (2 \cdot k_i \cdot I_{1H})]. \quad (4.30)$$

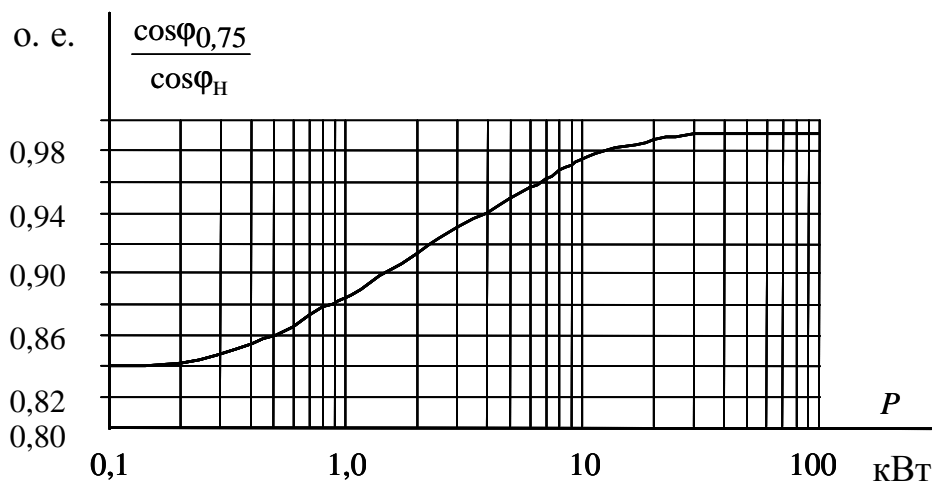


Рис. 4.4. Зависимость  $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$  от мощности асинхронного двигателя

Значение коэффициента  $\beta$ , согласно источнику [4], находится в диапазоне  $0,6 \div 2,5$ .

Определим коэффициент [8]

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H), \quad (4.31)$$

тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1/s_K) C_1, \text{ Ом.} \quad (4.32)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно найти по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta, \text{ Ом.} \quad (4.33)$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{кн}$ :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_K^2) - \beta^2}. \quad (4.34)$$

Очевидно, что при отрицательном подкоренном выражении (4.34) первоначально принятое значение  $\beta$  необходимо изменить.

Тогда индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2'. \quad (4.35)$$

Для того чтобы выделить из индуктивного сопротивления короткого замыкания  $X_{кн}$  сопротивления рассеяния фаз статора  $X_{1\sigmaн}$  и ротора  $X_{2\sigmaн}'$ , воспользуемся соотношениями [8], которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано по уравнению:

$$X_{2\sigmaн}' = 0,58 \cdot X_{кн} / C_1, \text{ Ом.} \quad (4.36)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1\sigmaн} = 0,42 \cdot X_{кн}, \text{ Ом.} \quad (4.37)$$

Согласно векторной диаграмме (см. рис. 4.7) ЭДС ветви намагничивания  $E_m$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_{mн} = \sqrt{(U_{1н} \cdot \cos \phi_{1н} - R_1 \cdot I_{1н})^2 + (U_{1н} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{1н}} - X_{1\sigmaн} \cdot I_{1н})^2}, \quad (4.38)$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{mн} = E_{mн} / I_0. \quad (4.39)$$

Приведенная методика дает удовлетворительное схождение расчетных механических характеристик и механических характеристик, построенных по трем паспортным точкам на рабочем участке механической характеристики, т. е. при изменении скольжения  $s$  от 0 до  $s_K$ .

Используя параметры схемы замещения, можно произвести расчет механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя.

**Пример 4.2.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6УЗ определить параметры Т-образной схемы замещения. Двигатель имеет следующие технические данные [4]:

- номинальная мощность  $P_H = 4$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1H} = 220$  В;
- синхронная частота вращения  $n_0 = 1000$  об/мин;
- номинальное скольжение  $s_H = 0,051$  о. е.;
- коэффициент полезного действия электродвигателя в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка)  $\eta_H = 82$  %;
- коэффициент мощности в режиме номинальной мощности  $\cos \varphi_H = 0,81$  о. е.;
- кратность пускового тока  $I_{II}/I_{1H} = k_i = 6$  о. е.;
- кратность пускового момента  $M_{II}/M_H = k_{II} = 2$  о. е.;
- кратность максимального момента  $M_{max}/M_H = k_{max} = 2,2$  о. е.;
- кратность минимального момента  $M_{min}/M_H = k_{min} = 1,6$  о. е.

*Решение*

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{7,29^2 - [0,75 \cdot 9,125 \cdot (1 - 0,051) / (1 - 0,75 \cdot 0,051)]^2}{1 - [0,75(1 - 0,051) / (1 - 0,75 \cdot 0,051)]^2}} = 4,046 \text{ А,}$$

где  $I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,82} = 9,125$  А – номинальный ток статора двигателя;

$m_1 = 3$  – число фаз асинхронного двигателя;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,76 \cdot 0,82} = 7,29 \text{ А – ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{p_*} = 0,94 \cdot \cos \varphi_H = 0,94 \cdot 0,81 = 0,76$  о. е. – коэффициент мощности при частичной нагрузке (см. рис. 1.6);

$\eta_{p_*} = \eta_H = 0,82$  о. е. – КПД при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_H = 0,75$  о. е. – коэффициент загрузки двигателя.

Критическое скольжение:

$$s_K = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{(k_{\max})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,051 \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1,3(2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,051 \cdot 1,3(2,2 - 1)} = 0,2547.$$

Значение коэффициента  $\beta$ , согласно [4], находится в диапазоне  $0,6 \div 2,5$ . Принимаем  $\beta = 1,3$ .

Определим коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{4,046}{2 \cdot 6 \cdot 9,125} = 1,037;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 (1 - 0,051)}{2 \cdot 1,037 \cdot 2,2 \cdot 4000} = 7,55.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_K) \cdot C_1} = \frac{7,55}{(1,3 + 1/0,2435) \cdot 1,037} = 1,393 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,037 \cdot 1,393 \cdot 1,3 = 1,878 \text{ Ом.}$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{KH}$ :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_K^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0,2547^2) - 1,3^2} = 3,704.$$

Тогда

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 3,704 \cdot 1,037 \cdot 1,393 = 5,352.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано по уравнению:

$$X_{2\sigma H}' = 0,58 \cdot X_{KH} / C_1 = 0,58 \cdot 5,352 / 1,037 = 2,994 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1\sigma H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 5,352 = 2,248 \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания  $E_m$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_m = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi_{1H} - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1H}} - X_{1\sigma H} \cdot I_{1H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,81 - 1,878 \cdot 9,125)^2 + \left(220 \sqrt{1 - 0,81^2} - 2,248 \cdot 9,125\right)^2} = 194,15 \text{ В},$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{mH} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{194,15}{4,046} = 47,98 \text{ Ом}.$$

В табл. 4.2 приведены параметры схемы замещения асинхронного двигателя, рассчитанные по каталожным данным (строка 1), заложенные в проектные расчеты этого двигателя [4] (строка 2), а также погрешность  $\delta$ , %, определения каждого из параметров (строка 3).

Таблица 4.2

Параметр	$R_1$	$X_{1\sigma}$	$R_2'$	$X_{2\sigma}'$	$X_m$
Расчет	1,878	2,248	1,393	2,994	47,98
Проект	1,856	1,759	1,494	2,651	48,2
Погрешность, %	1,17	21,7	8,0	11,4	0,456

Как следует из анализа результатов, приведенных в табл. 4.2, сходимость расчетных параметров схемы замещения и проектных данных завода-изготовителя в основном находится в инженерных допусках.

#### 4.5. Расчет естественных механических и электромеханических характеристик электродвигателей

*Естественной электромеханической (механической) характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости двигателя  $\omega$  от его тока якоря  $I$  (момента  $M$ ), полученную при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя.

Исходными данными для расчета являются номинальные данные электродвигателя.

##### 4.5.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

Естественная электромеханическая характеристика рассчитывается по уравнению:

$$\omega = \frac{U_H}{c} - I \cdot \frac{R_{\text{дв.гор}}}{c}. \quad (4.40)$$

Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока строится по выражению:

$$\omega = \frac{U_H}{c} - M \cdot \frac{R_{\text{дв.гор}}}{c^2}. \quad (4.41)$$

**Пример 4.3.** Для двигателя постоянного тока типа П-11У4, имеющего технические данные [5], рассчитать и построить естественные статические электромеханическую и механическую характеристики.

Основные параметры двигателя:

- номинальная мощность  $P_{\text{дв.н}} = 0,3$  кВт;
- номинальное напряжение  $U_{\text{дв.н}} = 220$  В;
- номинальный ток двигателя  $I_{\text{дв.н}} = 2,066$  А ;
- сопротивление двигателя при  $15^\circ\text{C}$ ,  $R_{\text{дв}} = 14,6$  Ом;
- номинальная частота вращения  $n_{\text{дв.н}} = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ ;
- индуктивность двигателя  $L_{\text{дв}} = 0,248$  Гн;
- момент инерции якоря двигателя  $J_{\text{дв}} = 0,0031$  кг·м<sup>2</sup>;
- допустимый ток двигателя  $I_{\text{доп}} = 4 \cdot I_{\text{дв.н}}$ .

*Решение*

Так как электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения описываются уравнениями прямой, то для их расчета и построения достаточно определить две любые точки. Как правило, координатами этих точек являются:

1) скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  при нулевом токе якоря и электромагнитном моменте;

2) номинальная угловая скорость  $\omega_H$  при номинальном токе  $I_{\text{дв.н}}$  и номинальном электромагнитном моменте  $M_H$ .

Определим дополнительные параметры двигателя:

- Номинальная угловая скорость:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.н}}}{30} = \frac{3,1415 \cdot 1500}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

- Сопротивление якоря двигателя в горячем состоянии:

$$R_{\text{дв.гор}} = 1,24 \cdot R_{\text{дв}} = 1,24 \cdot 14,6 = 18,1 \text{ Ом}.$$



- Коэффициент ЭДС  $\left(\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}\right)$  и электромагнитного момента  $\left(\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}\right)$

при номинальном потоке возбуждения:

$$c = \frac{U_{\text{дв.н}} - I_{\text{дв.н}} \cdot R_{\text{дв.гор}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{220 - 2,066 \cdot 18,1}{157,08} = 1,162.$$

- Угловая скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{дв.н}}}{c} = \frac{220}{1,162} = 189,33 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

- Номинальный электромагнитный момент двигателя:

$$M_{\text{н}} = c \cdot I_{\text{дв.н}} = 1,162 \cdot 2,066 = 2,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Пусковой ток или ток короткого замыкания:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{дв.н}}}{R_{\text{дв.гор}}} = \frac{220}{18,1} = 12,15 \text{ А}.$$

Рассчитанные статическая естественная электромеханическая и механическая характеристики двигателя приведены на рис. 4.5.

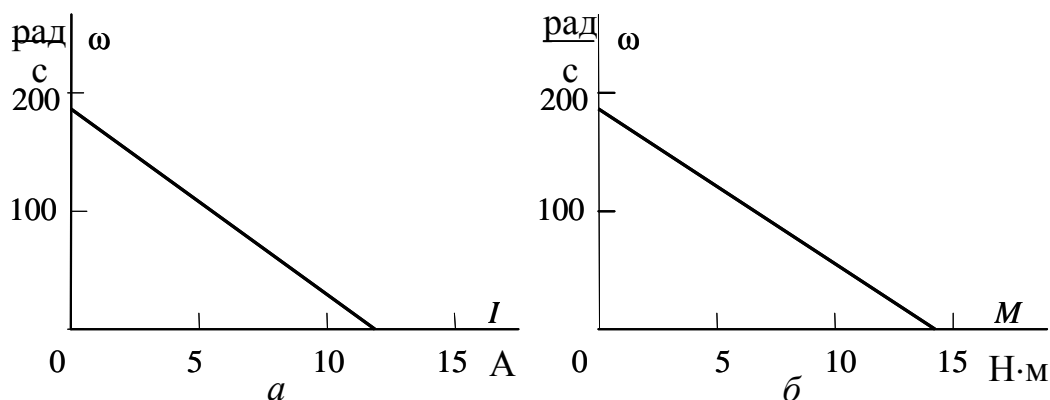


Рис. 4.5. Статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения: а – электромеханические; б – механические

- Допустимый ток двигателя:

$$I_{\text{доп}} = 4 \cdot I_{\text{дв.н}} = 4 \cdot 2,066 = 8,264 \text{ А}.$$

**Вывод.** Естественная электромеханическая характеристика двигателя не обеспечивает ограничение пускового тока на допустимом уровне. Как следствие – неудовлетворительная коммутация на коллекторе и выход коллектора из строя при пуске двигателя прямым включением в сеть.

## 4.5.2. Асинхронный двигатель

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя необходимо воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения, рис. 4.6.

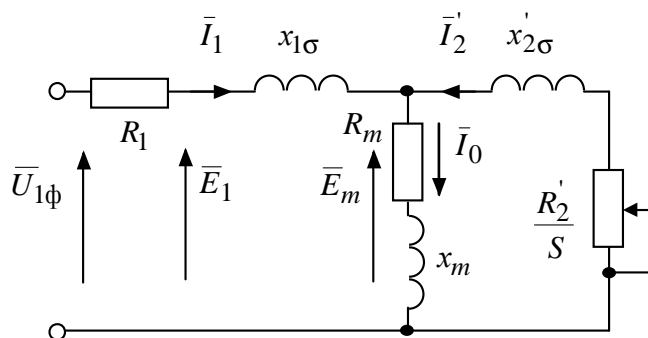


Рис. 4.6. Схема замещения асинхронного двигателя

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_1 - j \cdot x_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - \bar{R}_1 \cdot \bar{I}_1 &= 0; \\ \bar{E}_1 + j \cdot \bar{x}'_{2\sigma} \cdot \bar{I}'_2 + \frac{\bar{R}'_2}{S} \cdot \bar{I}'_2 &= 0; \\ \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - \bar{I}_0 &= 0, \end{aligned} \quad (4.42)$$

где  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение обмотки статора двигателя, В;

$E_1$  – ЭДС обмотки статора, В;

$x_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$x'_{2\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

$R'_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

$I_1$  – ток обмотки статора, А;

$I'_2$  – ток обмотки ротора, приведенной к обмотке статора, А;

$I_0$  – ток холостого хода обмотки статора, А.

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений асинхронного двигателя, удовлетворяющая системе уравнений (4.42), изображена на рис. 4.7.

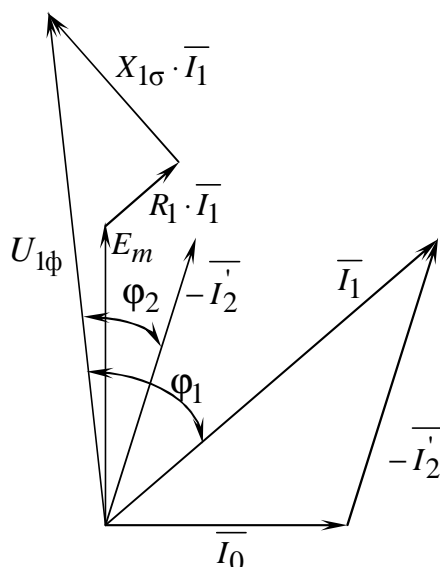


Рис. 4.7. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Ток ротора  $I_2'$ , приведенный к обмотке статора асинхронного двигателя, определяется зависимостью, получаемой непосредственно из схемы замещения асинхронного двигателя:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2}}, \quad (4.43)$$

где  $X_{\text{кн}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'$  – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Уравнение  $I_2' = f(s)$  называется электромеханической характеристикой асинхронного двигателя.

Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представляет интерес другая электромеханическая характеристика:  $I_1 = f(s)$ , отражающая зависимость тока статора  $I_1$  от скольжения  $s$ . Ток статора  $I_1$  определяется путем сложения вектора тока намагничивания  $\bar{I}_0$  и вектора тока ротора  $\bar{I}_2'$  (рис. 4.7):

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2'. \quad (4.44)$$

Полагая ток намагничивания асинхронного двигателя  $I_0$  реактивным, ток статора  $I_1$  через приведенный ток ротора  $I_2'$  можно найти по формуле [9]

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2}, \quad (4.45)$$

где

$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}}. \quad (4.46)$$

Основной выходной координатой силового привода является электромагнитный момент, значение которого для асинхронного двигателя определяется по выражению

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ \left(R_1 + R_2' \cdot s^{-1}\right)^2 + \left(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'\right)^2 \right]}, \quad (4.47)$$

где  $m_1$  – число фаз статора.

Механическая характеристика (4.47) асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые находятся при условии  $dM/ds = 0$ .

Тогда критический момент

$$M_{\text{к}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)}, \quad (4.48)$$

критическое скольжение

$$s_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}}. \quad (4.49)$$

Знак «+» означает, что критический момент и скольжение относятся к двигательному режиму, знак «-» – к генераторному режиму рекуперативного торможения.

Уравнение механической характеристики асинхронного двигателя (4.47) можно преобразовать к более удобному для пользования выражению – формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}}(1 + a \cdot s_{\text{к}})}{\frac{s_{\text{к}} + s}{s} + 2 \cdot a \cdot s_{\text{к}}}, \quad (4.50)$$

где  $a = \frac{R_1}{R_2}$ , – коэффициент.

Двигатели средней и большой мощности имеют малое активное сопротивление  $R_1$ , в этом случае коэффициентом  $a$  можно пренебречь, а выражение (4.50) преобразуется в упрощенную формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}}}{\frac{s_{\text{к}} + s}{s}}. \quad (4.51)$$

Задаваясь скольжением  $s$ , можно по выражениям (4.50) или (4.51) построить механические характеристики асинхронного двигателя.

Естественные механическая и электромеханическая характеристики короткозамкнутого асинхронного двигателя представлены на рис. 4.8.

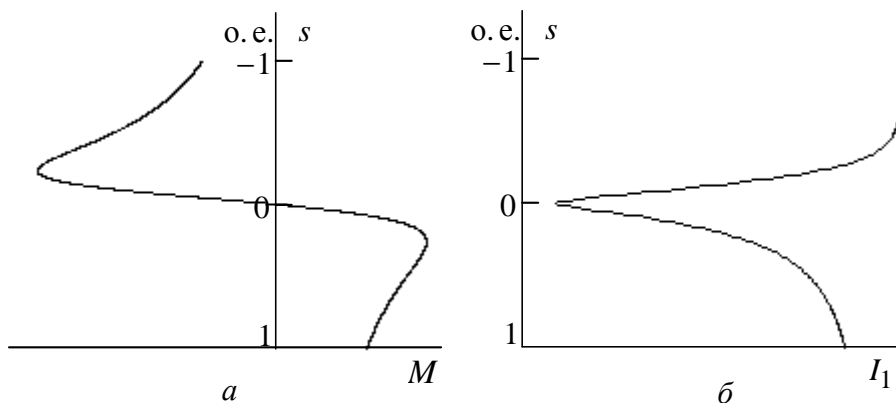


Рис. 4.8. Статические характеристики асинхронного двигателя:  $a$  – механическая,  $b$  – электромеханическая

**Пример 4.4.** Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором типа 4А112МВ6У3 рассчитать и построить естественные механическую и электромеханическую статические характеристики.

Основные параметры асинхронного двигателя и его схемы замещения:

- номинальная мощность двигателя  $P_{\text{н}} = 4$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1\text{фн}} = 220$  В;
- номинальное скольжение  $s_{\text{н}} = 0,051$  о. е.;
- номинальный ток обмотки статора  $I_{1\text{н}} = 9,125$  А;
- активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 1,878$  Ом;

- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора  $X_{1\sigma} = 2,248$  Ом;
- активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора  $R_2' = 1,393$  Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,  $X_{2\sigma}' = 2,994$  Ом;
- номинальное скольжение  $s_H = 0,051$  о. е.;
- кратность пускового тока  $I_{п}/I_{1H} = k_i = 6$  о. е.;
- кратность максимального момента  $M_{\max}/M_H = k_{\max} = 2,2$  о. е.;
- кратность минимального момента  $M_{\min}/M_H = k_{\min} = 1,6$  о. е.

### Решение

Определим синхронную угловую скорость двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,1415 \cdot 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Расчет естественной механической характеристики асинхронного двигателя произведем в соответствии с выражением (4.47):

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + R_2' \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,393}{104,7 \cdot s \cdot [(1,878 + 1,393/s)^2 + (2,248 + 2,994)^2]}$$

Механическая характеристика, рассчитанная по (4.47) в математической системе MathCAD, приведена на рис. 4.9.

Определим дополнительные параметры двигателя:

- Критический момент двигательного режима:

$$M_{\text{кд}} = \frac{m \cdot U_{1\phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \left( 1,878 + \sqrt{1,878^2 + 5,242^2} \right)} = 93,216 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Критическое скольжение:

$$s_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \pm \frac{1,393}{\sqrt{1,878^2 + 5,242^2}} = \pm 0,2456 \text{ о. е.}$$

- Номинальная скорость двигателя:

$$\omega_H = \omega_0(1 - s_H) = 104,7(1 - 0,051) = 99,36 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

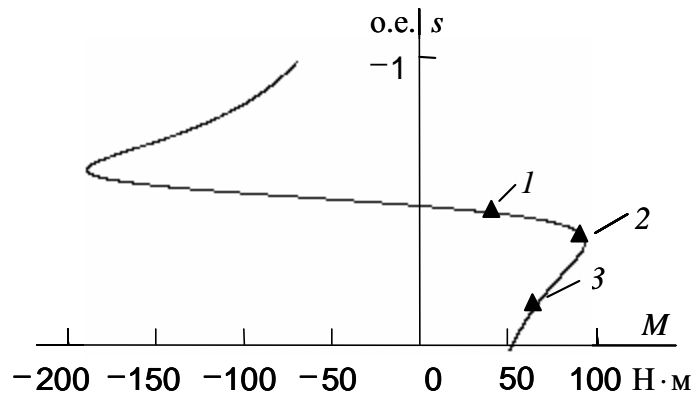


Рис. 4.9. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя: 1 – момент номинальный; 2 – момент максимальный; 3 – момент минимальный

- Номинальный момент двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{4000}{99,36} = 40,25 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Максимальный момент двигателя:

$$M_K = k_{\max} \cdot M_H = 2,2 \cdot 40,25 = 88,55 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Минимальный момент двигателя:

$$M_{\min} = k_{\min} \cdot M_H = 1,6 \cdot 40,25 = 64,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Найденные координаты точек с номинальным, максимальным и минимальным моментом нанесены на рассчитанный график (рис. 4.9) естественной механической характеристики асинхронного двигателя в виде треугольников.

**Вывод.** Анализ расчетов показывает, что контрольные точки, найденные в соответствии с каталожными данными двигателя, хорошо совпадают с рассчитанным графиком механической характеристики асинхронного двигателя, поэтому методику определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным можно считать приемлемой.

Определим зависимость тока ротора  $I_2'$ , приведенного к обмотке статора, от скольжения  $s$ :

$$I_2' = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{s}\right)^2 + 5,242^2}}.$$

График электромеханической характеристики  $I_2' = f(s)$ , рассчитанный по (4.43) в математической системе MathCAD, приведен на рис. 4.10.

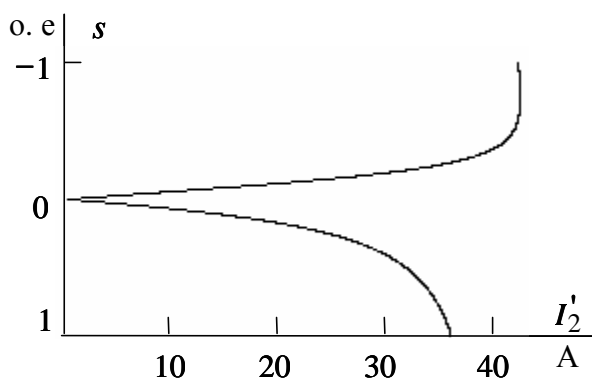


Рис. 4.10. График электромеханической характеристики  $I_2' = f(s)$

Электромеханическую характеристику  $I_1 = f(s)$  рассчитаем по выражению (4.45) с учетом тока  $I_2'$ , найденного по уравнению (4.43), тогда

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} = \sqrt{4,046^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 4,046 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2},$$

где 
$$\sin \varphi_2 = \frac{x_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{KH}^2}} = \frac{5,17}{\sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{s}\right)^2 + 5,242^2}}.$$

Электромеханическая характеристика  $I_1 = f(s)$  приведена на рис. 4.11.

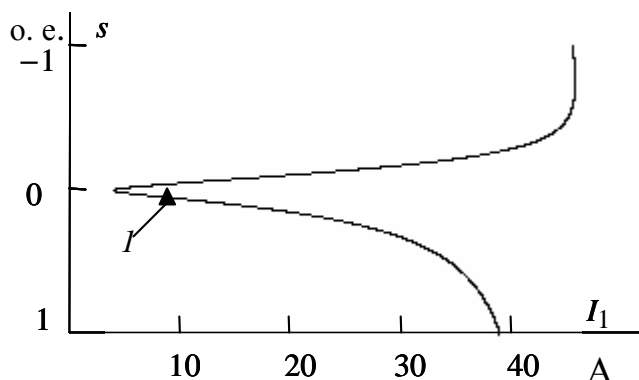


Рис. 4.11. График естественной электромеханической характеристики  $I_1 = f(s)$  асинхронного двигателя:  $I$  – координаты точки с номинальными параметрами двигателя



Определим номинальный ток статора асинхронного двигателя  $I_{1н}$  при номинальном скольжении  $s_H = 0,051$  в соответствии с электромеханической характеристикой.

Номинальный ток ротора двигателя при номинальном скольжении:

$$I'_{2н} = \frac{U_{1фн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{кн}^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{0,051}\right)^2 + 5,242^2}} = 7,42 \text{ А.}$$

Синус угла между вектором фазного напряжения  $\overline{U_{1ф}}$  и сопряженным вектором тока ротора  $-\overline{I'_2}$  (см. рис. 4.7):

$$\sin \varphi_{2н} = \frac{x_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + x_{кн}^2}} = \frac{5,17}{\sqrt{\left(1,878 + \frac{1,393}{0,051}\right)^2 + 5,242^2}} = 0,00595.$$

Номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1н} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_{2н}} =$$

$$= \sqrt{4,046^2 + 7,42^2 + 2 \cdot 4,046 \cdot 7,42 \cdot 0,00595} = 9,056 \text{ А.}$$

**Вывод.** Значение номинального тока статора асинхронного двигателя, определенное по его электромеханической характеристике, практически совпадает со значением, рассчитанным по каталожным данным:  $I_{1н} = 9,125 \text{ А}$  (см. пример 4.1). Это подтверждает правильность методики определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя по его каталожным данным.

## 4.6. Расчет основных элементов силовых цепей электропривода

### 4.6.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

При выполнении этого пункта задания для электроприводов с реостатным регулированием скорости вначале требуется рассчитать величины добавочных резисторов  $R_{дi}$ , при которых механическая характеристика пройдет через заданные рабочие точки с координатами

$\omega_{иi}$ ,  $M_{ci}$ . Для этого воспользуемся формулой механической характеристики двигателя при реостатном регулировании скорости:

$$\omega = \frac{U_H}{c} - M \cdot \frac{R_{дв.гор} + R_{ди}}{c^2}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (4.52)$$

Из (4.52) по заданным координатам рабочих точек  $\omega_{иi}$ ,  $M_{ci}$  и известным параметрам двигателя  $R_{дв.гор}$ ,  $U_H$ ,  $c$  находится  $R_{ди}$ :

$$R_{ди} = \frac{U_H \cdot c - \omega_{иi} \cdot c^2}{M_{ci}} - R_{дв.гор}, \text{ Ом}, \quad (4.53)$$

где  $\omega_{иi} = \omega_i \cdot i_p$  – угловая скорость двигателя на  $i$ -ой характеристике, соответствующая  $M_{ci}$ ;

$M_{ci}$  – статический момент производственного механизма, приведенный к валу двигателя.

Статический момент производственного механизма, приведенный к валу электрической машины, определяется как

$$M_{ci} = \frac{M_i}{\eta_{п} \cdot i_{ст.р}}, \quad (4.54)$$

– для двигательного режима;

$$M_{ci} = \frac{M_i}{i_{ст.р}} \eta_{п}, \text{ Н} \cdot \text{ м}, \quad (4.55)$$

– для генераторных режимов с активной нагрузкой, приведенной к валу электрической машины.

Искомое значение  $R_{ди}$  может быть определено также графоаналитическим способом, так называемым «методом отрезков» [5].

Для двигателей постоянного тока пуск, реверс, торможение, а также регулирование скорости должны осуществляться при наложенных на ток и момент ограничениях.

Для электродвигателя постоянного тока ограничение момента осуществляется путём ограничения тока якоря:

$$I_{дв.мах} \leq \frac{M_{доп}}{c}, \quad (4.56)$$

где  $M_{доп}$  – максимально допустимый момент производственного механизма, определяемый его механической прочностью;

$c$  – коэффициент электромагнитного момента.

Ограничение тока необходимо также для защиты двигателя от перегрузок в переходных режимах. Максимальный ток якоря двигателя  $I_{дв.мах}$  следует ограничить из условия удовлетворительной коммутации на коллекторе на уровне:

$$I_{\text{дв. max}} \leq I_{\text{дв. н}} \cdot \lambda_I, \quad (4.57)$$

где  $\lambda_I$  – коэффициент допустимой перегрузки двигателя по току.

Для некоторых производственных механизмов необходимо ограничивать на допустимом уровне ускорение  $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{доп}}$  рабочих органов в переходных режимах, в этом случае максимальный ток якоря двигателя определяется условием:

$$I_{\text{дв. max}} \leq \frac{J_{\Sigma}}{c} \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{доп}} + \frac{M_c}{c}, \quad (4.58)$$

где  $J_{\Sigma}$  – эквивалентный момент инерции электропривода,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$M_c$  – момент статической нагрузки на валу двигателя,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

Таким образом, ток двигателя определяется допустимой нагрузкой механизма по условиям его механической прочности, допустимой перегрузкой двигателя по току и допустимым ускорением перемещения рабочего органа производственного механизма. Если дополнительных условий не задано, то максимальный ток якоря двигателя определяется по (4.55) из условия удовлетворительной коммутации на коллекторе.

В электроприводах постоянного тока с релейно-контакторной схемой управления ток якоря ограничивают введением на время пуска в цепь обмотки якоря двигателя добавочных сопротивлений. Схема силовых цепей такого электропривода приведена на рис. 4.12.

Схема содержит обмотку якоря двигателя  $M$ , контакт пускателя  $KM$ , два последовательно включенных добавочных сопротивления  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ , которые шунтированы замыкающими контактами  $KM1$  и  $KM2$ . Обмотка возбуждения двигателя  $LM$  питается от отдельного источника напряжения  $U_{\text{ов}}$ .

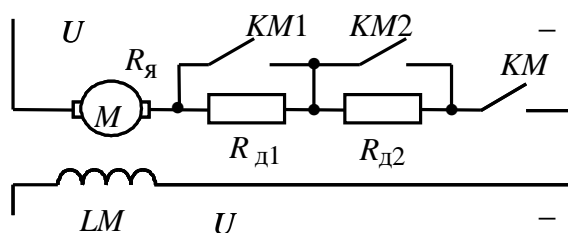


Рис. 4.12. Схема силовых цепей двигателя постоянного тока при реостатном пуске в две ступени пусковых сопротивлений

Электромеханические характеристики электропривода при пуске двигателя в две ступени приведены на рис. 4.13.

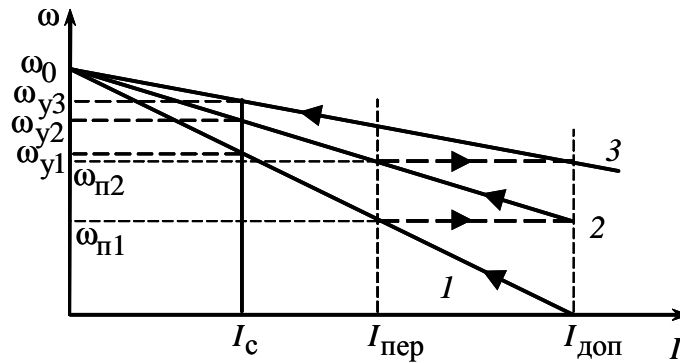


Рис. 4.13. Электромеханические характеристики реостатного пуска двигателя в две ступени

Порядок построения пусковых характеристик следующий:

- строится естественная или регулировочная характеристика 3 с заданной рабочей скоростью  $\omega_{y3}$  (порядок расчета естественной электромеханической характеристики рассмотрен в примере 4.1);
- строится первая пусковая электромеханическая характеристика 1. Характеристика 1 проходит через две точки: скорости идеального холостого хода при токе якоря, равном нулю ( $\omega_0, I = 0$ ), и допустимого тока  $I_{доп}$  при скорости, равной нулю ( $\omega = 0$ ). Значение допустимого тока  $I_{доп}$  обычно определяется из условия удовлетворительной коммутации;
- определяется ток переключения  $I_{пер}$ , который принимается равным значению (4.57):

$$I_{пер} \geq (1,1 \div 1,2) \cdot I_H ; \quad (4.59)$$

- в точке с координатами  $(I_{пер}, \omega_{п1})$  происходит закорачивание первого пускового сопротивления  $R_{д1}$  и двигатель переходит на пусковую характеристику 2. Таким образом, характеристика 2 проходит через две точки: скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  при токе якоря, равном нулю ( $I = 0$ ), и допустимого тока  $I_{доп}$  при скорости, равной  $\omega_{п1}$ .

Закорачивание второго пускового сопротивления  $R_{д2}$  также необходимо производить при токе переключения  $I_{пер}$ . Бросок тока при переходе двигателя на естественную характеристику должен быть равен допустимому току  $I_{доп}$ . Если это не происходит, то ток переключения  $I_{пер}$  необходимо поменять, соответственно несколько увеличив или уменьшив его, однако если ток переключения становится меньше  $1,1 \cdot I_H$ , то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений. Конечный график пусковых электромеханических характеристик должен

выглядеть так, как показано на рис. 4.13, в этом случае при заданном числе пусковых ступеней переходный процесс будет протекать за меньшее время по сравнению с другими вариантами построения характеристик.

Пусковые сопротивления при пуске двигателя в две ступени можно определить графо-аналитически:

$$R_{п2} = \frac{U_{н} - c \cdot \omega_{п1}}{I_{доп}} - R_{дв} \quad (4.60)$$

и

$$R_{п1} = \frac{U_{н}}{I_{доп}} - R_{дв} - R_{п2}, \quad (4.61)$$

где  $\omega_{п1}$  – берется из графика электромеханических характеристик рис. 4.13.

#### 4.6.2. Асинхронный двигатель

Расчет величины добавочного сопротивления ротора двигателя  $R'_{2д}$  удобно производить по расчетной формуле метода отрезков, записанного для асинхронного двигателя:

$$R'_{2ди} = R'_2 \cdot \left( \frac{s_{иi}}{s_e} - 1 \right), \text{ Ом}, \quad (4.62)$$

где  $s_{иi} = \frac{\omega_0 - \omega_{иi}}{\omega_0}$  – скольжение двигателя при моменте  $M_{ci}$  на реостатной характеристике, о. е.;

$s_e$  – скольжение, соответствующее моменту  $M_{ci}$  на естественной характеристике, о. е.;

$R'_2$  – активное фазное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом.

Величина регулировочного сопротивления, непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя, находится по формуле:

$$R_{2i} = \frac{R'_{2ди} - R'_2}{k_e^2}, \text{ Ом}, \quad (4.63)$$

где  $k_e$  – коэффициент трансформации ЭДС, который можно приближенно определить, зная номинальное линейное напряжение статора  $U_{1лн} = \sqrt{3} \cdot U_{1фн}$  и ЭДС между кольцами неподвижного разомкнутого ротора  $E_{2рн}$ :

$$k_e \approx 0,95 \frac{U_{1\text{ЛН}}}{E_{2\text{РН}}}.$$

Расчет величины добавочного сопротивления ротора асинхронного двигателя  $R'_{2\text{д}}$  можно произвести и аналитически, найдя его из формулы Клосса (4.52), заменив для простоты вычислений  $a \cdot s_{\text{к}}$  на  $q = a \cdot s_{\text{к}}$ :

$$M = M_{\text{к}} \cdot \frac{2 \cdot (1 + q)}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s} + 2 \cdot q}, \quad (4.64)$$

где  $s$  – скольжение ротора текущее;

$$s_{\text{ки}} = \frac{R'_2 + R'_{2\text{ди}}}{\sqrt{R_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2}} - \quad (4.65)$$

скольжение ротора критическое.

Решая (4.64) при заданных  $s_{\text{ии}}$  и  $M_{\text{си}}$  относительно  $s_{\text{ки}}$ , получим:

$$s_{\text{ки}} = s_{\text{ии}} \cdot \left\{ \frac{(1 + q) \cdot M_{\text{к}}}{M_{\text{си}}} - q + \sqrt{\left[ \frac{(1 + q) \cdot M_{\text{к}}}{M_{\text{си}}} - q \right]^2 - 1} \right\}. \quad (4.66)$$

Тогда из (4.65):

$$R'_{2\text{ди}} = s_{\text{ки}} \cdot \sqrt{R_1^2 + (x_{1\sigma} + x'_{2\sigma})^2} - R'_2, \text{ Ом.} \quad (4.67)$$

Проверка сопротивлений по нагреву выполняется, как правило, после расчета переходных процессов.

Для асинхронных двигателей с фазным ротором пуск, реверс, торможение, регулирование скорости, также как и у двигателей постоянного тока, необходимо осуществлять при наложенных на ток и момент ограничениях. Отличие состоит лишь в том, что максимальные значения тока у двигателя постоянного тока ограничиваются условиями удовлетворительной коммутации, а у асинхронных двигателей с фазным ротором они ограничиваются возникающими динамическими усилиями в обмотках и нагревом обмоток большими пусковыми токами [5].

Схема силовых цепей при реостатном пуске асинхронного двигателя приведена на рис. 4.14.

Максимальные пусковые пики моментов  $M_{\text{max}}$  асинхронных двигателей желательно принимать из условия:

$$M_{\text{max}} = 0,85 \cdot M_{\text{к}}. \quad (4.68)$$

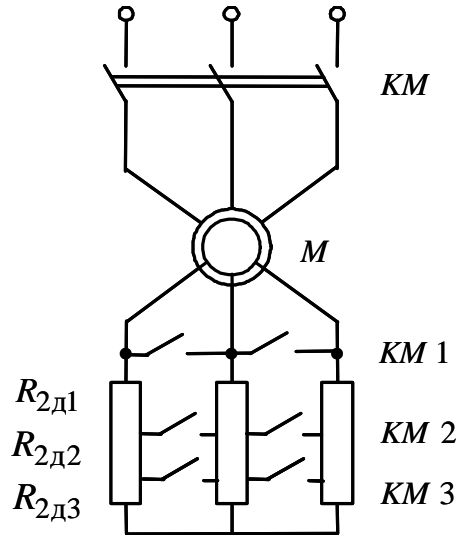


Рис. 4.14. Схема силовых цепей асинхронного двигателя

Для двигателей малой мощности допускается принимать пики момента, равные критическому  $M_k$ .

Момент переключения  $M_{пер}$  следует выбирать из условия:

$$M_{пер} = (1,1 - 1,3) \cdot M_H. \quad (4.69)$$

Примерный вид механических характеристик при пуске асинхронного двигателя в три ступени пусковых сопротивлений приведен на рис. 4.15.

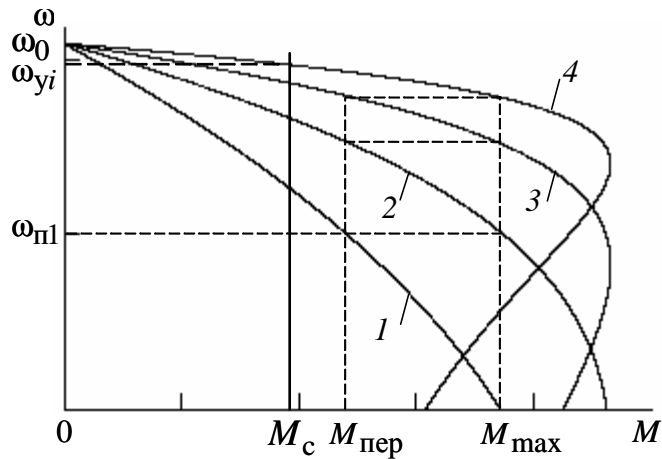


Рис. 4.15. Механические характеристики реостатного пуска асинхронного двигателя в три ступени

Порядок построения пусковых характеристик следующий:

- строится естественная или регулировочная характеристика 4 с заданной рабочей скоростью  $\omega_{yi}$ . Строится первая пусковая механи-

ческая характеристика 1. Характеристика 1 проходит через две точки: синхронная скорость  $\omega_0$  при моменте двигателя, равном нулю ( $M = 0$ ), и допустимый момент  $M_{\max}$  при скорости, равной нулю ( $\omega = 0$ );

- определяется момент переключения  $M_{\text{пер}}$ , который принимается равным:

$$M_{\text{пер}} = (1,1 \div 1,3) \cdot M_{\text{н}};$$

- в точке с координатами  $(M_{\text{пер}}, \omega_{\text{п1}})$  происходит закорачивание первого пускового сопротивления  $R_{\text{д1}}$ , и двигатель переходит на пусковую характеристику 2. Таким образом, характеристика 2 проходит через две точки: синхронной скорости  $\omega_0$  при моменте двигателя, равном нулю ( $M = 0$ ), и максимальном моменте  $M_{\max}$  при скорости, равной  $\omega_{\text{п1}}$ .

Закорачивание второго  $R_{\text{д2}}$  и третьего  $R_{\text{д3}}$  пускового сопротивления также необходимо производить при моменте переключения  $M_{\text{пер}}$ . Бросок момента при переходе двигателя на естественную характеристику должен быть равен максимальному моменту  $M_{\max}$ .

Если это не происходит, то момент переключения  $M_{\text{пер}}$  необходимо поменять, соответственно несколько увеличив или уменьшив его, однако если момент переключения становится меньше  $1,1 \cdot M_{\text{н}}$ , то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений.

Все построения удобно выполнять в программной среде MathCAD в численных значениях параметров асинхронного двигателя, тогда за 2–3 итерации удастся построить все пусковые характеристики и определить пусковые сопротивления.

Конечный график пусковых статических характеристик должен выглядеть так, как показано на рис. 4.15: в этом случае при заданном числе пусковых ступеней переходный процесс будет протекать за меньшее время по сравнению с другими вариантами построения пусковых механических характеристик.

Расчет величин пусковых сопротивлений  $R'_{\text{д}i}$  можно произвести аналитически, последовательно в соответствии с уравнениями (4.66), (4.67).

Значение пускового сопротивления  $R_{\text{д}i}$ , непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя, находится по формуле:

$$R_{\text{д}i} = \frac{R'_{\text{д}i}}{k_e^2}, \text{ Ом.} \quad (4.70)$$



## 4.7. Тормозные режимы работы электроприводов

В электроприводах с релейно-контакторными схемами управления применяются все три вида электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

*Рекуперативное торможение* обычно применяется для реверсивных электроприводов с активной нагрузкой, при работе электропривода в четвертом квадранте – с угловой скоростью, большей скорости идеального холостого хода (синхронной скоростью для электроприводов переменного тока). Электромеханическая и механическая характеристики режима рекуперативного торможения являются продолжением характеристик двигательного режима работы электрических машин и рассчитываются по уравнениям (4.40) и (4.41) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения и (4.43), (4.45), (4.50) – для асинхронного двигателя. На практике, при питании обмоток двигателя постоянного тока от нерегулируемого выпрямителя, для возникновения режима рекуперативного торможения необходимо наличие параллельно с двигателем нагрузки.

*Торможение противовключением* применяется для реверсивных электроприводов, в которых замедление электропривода переходит в режим пуска в противоположном направлении или только для быстрой неавтоматической остановки. Режим торможения противовключением используется также для работы с установившейся скоростью электроприводов с активной нагрузкой в четвертом квадранте.

*Динамическое торможение*, как правило, применяется для нереверсивных электроприводов. Оно применяется и для реверсивных электроприводов с реактивной нагрузкой, требующих автоматической остановки. Для электроприводов с активной нагрузкой режим динамического торможения используется для работы с малой установившейся скоростью в четвертом квадранте.

### 4.7.1. Динамическое торможение электрических машин постоянного тока

В электроприводах постоянного тока перевод двигателя в режим динамического торможения осуществляется отключением обмотки якоря от источника постоянного напряжения и замыканием ее через добавочное сопротивление накоротко. Схема включения электрической машины в режиме динамического торможения приведена на рис. 4.16.

Уравнение электромеханической характеристики образуется из выражения (4.40) при подстановке в него напряжения якоря  $U = 0$ :

$$\omega = -I \frac{R_{\text{яц}}}{k \cdot \Phi}, \quad (4.71)$$

где  $R_{\text{яц}} = R_{\text{яд.гор}} + R_{\text{дт}}$  – сопротивление якорной цепи двигателя в режиме динамического торможения;

$R_{\text{дт}}$  – сопротивление динамического торможения.

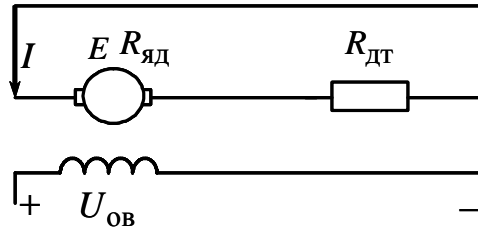


Рис. 4.16. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режиме динамического торможения

Ток в якоре электрической машины протекает за счет ЭДС  $E = c \cdot \omega$ :

$$I = \frac{E}{R_{\text{яц}}}. \quad (4.72)$$

Электромеханические характеристики электропривода постоянного тока, работающего в режиме динамического торможения, приведены на рис. 4.17.

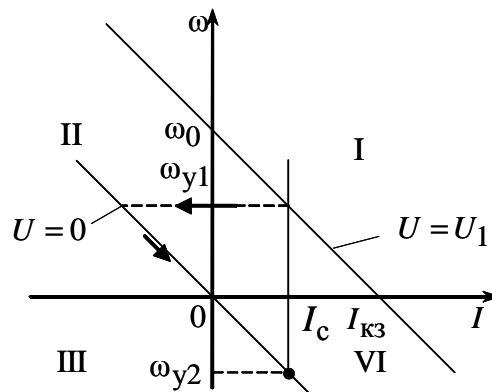


Рис. 4.17. Электромеханические характеристики режима динамического торможения двигателя постоянного тока

Режим работы возникает при преобразовании потенциальной энергии в электрическую (активная нагрузка на валу двигателя, работа элек-

тропровода с установившейся скоростью  $\omega_{y2}$ ) или при преобразовании кинетической энергии в электрическую (торможение двигателя при уменьшении ЭДС на обмотке якоря до нуля, начиная с установившейся скорости  $\omega_{y1}$ ).

Электрическая энергия от протекающего по якорю тока рассеивается на активных сопротивлениях якорной цепи двигателя  $R_{яц} = R_{дв} + R_{дт}$ , преобразуясь в тепловую.

#### 4.7.2. Динамическое торможение асинхронного двигателя

Схема включения асинхронной электрической машины в режиме динамического торможения приведена на рис. 4.18. В электроприводах с асинхронными двигателями режим динамического торможения возникает при отключении обмоток статора от сети переменного напряжения контактором  $KМ$  и подключении ее через добавочное сопротивление динамического торможения  $R_{дт}$ , которое ограничивает ток статора на допустимом уровне, к источнику постоянного напряжения контактором  $KМ2$ .

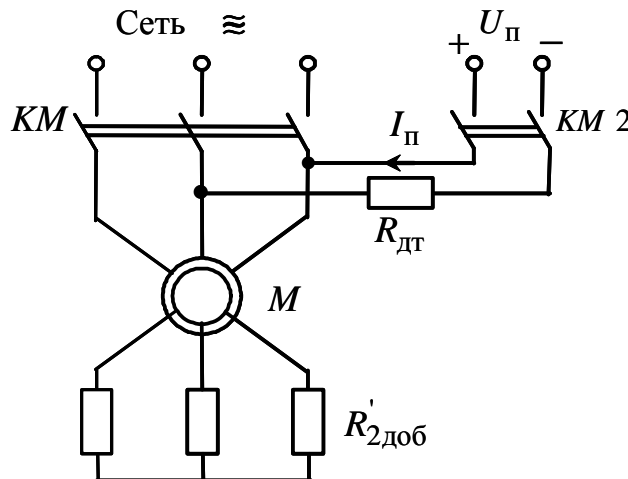


Рис. 4.18. Схема включения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронной машиной в режиме динамического торможения, определяется уравнением [11]:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кдт}}{\frac{v_k}{v} + \frac{v}{v_k}}, \quad (4.73)$$

где  $v = \frac{\omega}{\omega_0}$  – относительная скорость;

$$v_k = \frac{R_2' + R_{2\text{доб}}'}{X_{mH} + X_{2\text{сн}}'} \quad (4.74)$$

относительная критическая скорость;

$$M_{\text{кдт}} = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot X_{mH}^2}{2 \cdot \omega_0 (X_{mH} + X_{2\text{сн}}')} \quad (4.75)$$

критический момент асинхронного двигателя в режиме динамического торможения.

Значение постоянного тока намагничивания, эквивалентное переменному току статора  $I_1$ , определяется из условия:

$$I_{\text{п}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_1 \approx 1,225 \cdot I_1. \quad (4.76)$$

Из (4.76) следует, что постоянный ток, создающий магнитный поток, должен быть больше переменного тока намагничивания статора  $I_1$ . Это объясняется размагничивающим действием ротора [5].

Решим (4.75) относительно тока статора  $I_1$ :

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\text{кдт}} (X_{mH} + X_{2\text{сн}}')}{3 \cdot X_{mH}^2}}. \quad (4.77)$$

Задаваясь критическим моментом асинхронного двигателя в режиме динамического торможения  $M_{\text{кдт}}$ , при известных параметрах схемы замещения асинхронного двигателя, можно найти эквивалентный ток статора  $I_1$ , а затем и постоянный ток динамического торможения  $I_{\text{п}}$ . Очевидно, что критический момент асинхронной машины в режиме динамического торможения не должен превышать максимальный момент пусковых характеристик двигательного режима работы электрической машины:

$$M_{\text{кдт}} \leq M_{\text{max}} = 0,85 \cdot M_{\text{к}}. \quad (4.78)$$

Для двигателя с фазным ротором, при активной нагрузке рабочего органа производственного механизма, можно регулировать скорость в режиме динамического торможения изменением добавочного сопротивления  $R_{2\text{доб}}'$ .

Порядок расчета добавочного сопротивления  $R_{2\text{доб}}'$ , включаемого в цепь обмотки ротора, следующий:

- для найденной по выражению (4.1) установившейся скорости  $\omega_{y1}$  определяем относительное значение установившейся скорости:

$$v_{y1} = \frac{-\omega_{y1}}{\omega_0}, \text{ о. е.}, \quad (4.79)$$

где  $\omega_0$  – синхронная угловая скорость двигателя;

- рассчитываем значения момента сопротивления рабочего органа производственного механизма, приведенного к валу двигателя:

$$M_{ci} = \frac{M_i}{i_{ст.р}} \eta_{п}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- задаемся критическим моментом асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, равным критическому моменту асинхронного двигателя в двигательном режиме работы:

$$M_{кдт} = M_{к};$$

- зная критический момент динамического торможения  $M_{кдт}$  и параметры схемы замещения асинхронного двигателя, можно найти ток статора:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{кдт} (X_{mн} + X'_{2сн})}{3 \cdot X_{mн}^2}};$$

- найдем значение постоянного тока намагничивания, эквивалентное переменному току статора  $I_1$ , в соответствии с (4.76):

$$I_{п} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_1 \approx 1,225 \cdot I_1;$$

- для найденных значений относительной скорости  $-\omega_{y1}$ , критического момента двигателя в режиме динамического торможения  $M_{кдт}$  и момента сопротивления  $M_{ci}$  определим относительную скорость  $v_{к}$ , для чего решим уравнение (4.73) относительно  $v_{к}$ :

$$v_{к} = \frac{M_{кдт}}{M_{ci}} + \sqrt{\left(\frac{M_{кдт}}{M_{ci}}\right)^2 - v_{y1}}; \quad (4.80)$$

- из уравнения (4.74) определяем добавочное сопротивление:

$$R'_{2доб} = v_{к} (X_{mн} + X'_{2сн}) - R'_2; \quad (4.81)$$

- сопротивление динамического торможения, непосредственно включаемое в роторную цепь двигателя, находится по формуле (4.63):

$$R_{2доб} = \frac{R'_{2доб}}{k_e^2}, \text{ Ом.} \quad (4.82)$$

Очевидно, что включение сопротивления  $R_{2\text{доб}}$  в роторную цепь двигателя возможно только для двигателей с фазным ротором.

**Пример 4.5.** Для короткозамкнутого асинхронного двигателя типа 4А112МВ6У3 рассчитать и построить механическую характеристику динамического торможения.

Основные параметры асинхронного двигателя и его схемы замещения:

- номинальная мощность двигателя  $P_{\text{H}} = 4$  кВт;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1\text{фн}} = 220$  В;
- номинальное скольжение  $s_{\text{H}} = 0,051$  о. е.;
- номинальный ток обмотки статора  $I_{1\text{H}} = 9,125$  А;
- активное сопротивление фазы обмотки статора  $R_1 = 1,878$  Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора  $X_{1\sigma} = 2,248$  Ом;
- активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора,  $R_2' = 1,393$  Ом;
- индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,  $X_{2\sigma}' = 2,994$  Ом;
- индуктивное сопротивление контура намагничивания  $X_{\text{mn}} = 47,98$  Ом;
- кратность пускового тока  $I_{\text{п}}/I_{1\text{H}} = k_i = 6$  о. е.;
- кратность максимального момента  $M_{\text{max}}/M_{\text{H}} = k_{\text{max}} = 2,2$  о. е.;
- кратность минимального момента  $M_{\text{min}}/M_{\text{H}} = k_{\text{min}} = 1,6$  о. е.

*Решение*

- Определим синхронную угловую скорость двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,1415 \cdot 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

- Найдем номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{4000}{99,36} = 40,25 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Определим максимальный момент двигателя:

$$M_{\text{K}} = k_{\text{max}} \cdot M_{\text{H}} = 2,2 \cdot 40,25 = 88,55 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Определим критический момент асинхронной машины в режиме динамического торможения:

$$M_{\text{кдт}} = 0,85 \cdot M_{\text{K}} = 0,85 \cdot 88,55 = 75,27 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Найдем эквивалентный переменный ток статора:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\text{кдт}} (X_{\text{мн}} + X'_{2\text{сн}})}{3 \cdot X_{\text{мн}}^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 75,27(47,98 + 2,994)}{3 \cdot 47,98^2}} = 10,786 \text{ А.}$$

- Определим относительную критическую скорость:

$$v_{\text{к}} = \frac{R_2'}{X_{\text{мн}} + X'_{2\text{сн}}} = \frac{1,393}{47,98 + 2,994} = 0,273 \text{ о. е.}$$

Добавочное сопротивление в цепи ротора отсутствует ( $R'_{2\text{доб}} = 0$ ), т. к. в данном случае асинхронный двигатель – с короткозамкнутым ротором.

• Расчет механической характеристики асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, произведем в соответствии с выражением (4.71), подставляя в него значения относительной скорости от  $-1$  до  $1$ :

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кдт}}}{\frac{v_{\text{к}}}{v} + \frac{v}{v_{\text{к}}}} = \frac{2 \cdot 75,27}{\frac{0,273}{v} + \frac{v}{0,273}}.$$

Механическая характеристика динамического торможения асинхронного двигателя, рассчитанная в математической системе MathCAD, приведена на рис. 4.19.

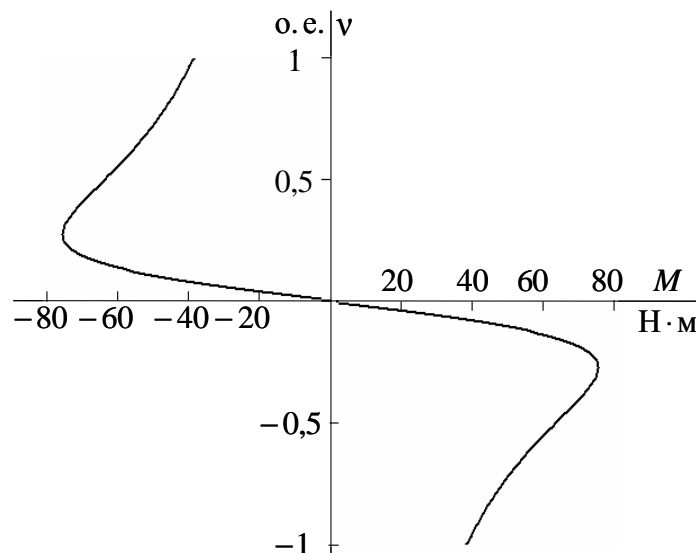


Рис. 4.19. Механическая характеристика асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

- Как следует из анализа рис. 4.19, механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения располагаются во втором и четвертом квадрантах. Торможение электродвигателя при любой скорости производится моментом, превышающим номинальный момент двигателя  $M_H = 40,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

## 4.8. Расчет переходных процессов и нагрузочных диаграмм электропривода

### 4.8.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

В курсовой работе должны быть рассчитаны переходные процессы тока, электромагнитного момента и угловой скорости двигателя за цикл работы электропривода. Метод расчета переходных процессов выбирается в соответствии с типом электропривода, формой механической характеристики производственного механизма и двигателя.

Переходные процессы электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения при линейных статических характеристиках двигателя и производственного механизма рассчитываются по формулам:

$$I = I_{уст} + (I_{нач} - I_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}}; \quad (4.83)$$

$$M = M_{уст} + (M_{нач} - M_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}}; \quad (4.84)$$

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}}, \quad (4.85)$$

где  $I_{нач}$  – начальное значение тока двигателя, А;

$I_{уст}$  – установившееся значение тока двигателя при моменте нагрузки  $M_c = M_{уст}$ , А;

$\omega_{уст}$  – установившаяся угловая скорость двигателя при моменте нагрузки  $M_c = M_{уст}$ ,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$\omega_{нач}$  – начальное значение угловой скорости,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$T_M$  – электромеханическая постоянная времени электропривода, с.



Расчет электромеханических постоянных времени  $T_{Mi}$  для каждой из реостатных характеристик (см. рис. 4.20) осуществляется в соответствии со следующими выражениями:

$$T_{Mi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega_i}{\Delta M_i}, \quad \text{или} \quad T_{Mi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{яцi}}{c^2}, \quad (4.86)$$

где  $\Delta\omega_i, \Delta M_i$  – соответствующие друг другу приращения скорости и момента на  $i$ -ой характеристике;

$R_{яцi}$  – суммарное сопротивление якорной цепи на соответствующей характеристике, Ом;

$c$  – коэффициент ЭДС,  $\frac{В \cdot с}{рад}$ ;

$J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя,  $кг \cdot м^2$ ;

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{д} + J_{м} \cdot \frac{1}{i_{ст.р}^2}, \quad (4.87)$$

где  $k = (1,05 \div 1,3)$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

$J_{дв}$  – момент инерции двигателя,  $кг \cdot м^2$ ;

$J_{м}$  – момент инерции производственного механизма,  $кг \cdot м^2$ ;

$i_{ст.р}$  – стандартное передаточное отношение редуктора.

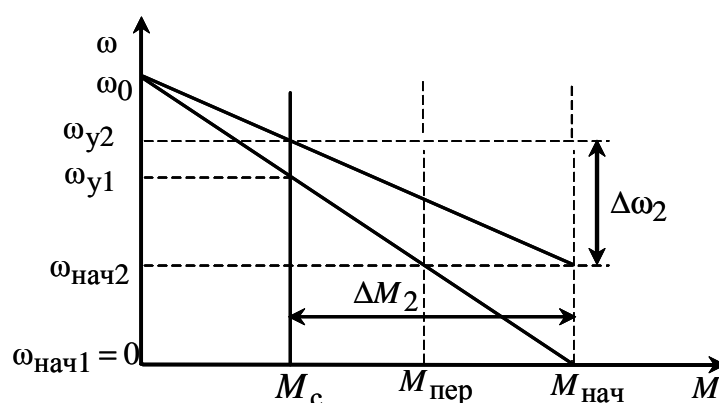


Рис. 4.20. Пусковые механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Время  $t_{\text{пп}i}$  работы двигателя на  $i$ -ой характеристике, при изменении момента в пределах от  $M_{\text{нач}}$  до  $M_{\text{кон}}$  определяется по формуле

$$t_{\text{пп}i} = T_{\text{mi}} \cdot \ln \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{M_{\text{кон}} - M_{\text{уст}}}, \quad (4.88)$$

где  $M_{\text{нач}}$ ,  $M_{\text{кон}}$  – начальное и конечное значения моментов двигателя постоянного тока, взятые из графика механической характеристики.

Так, например, для определения времени переходного процесса при пуске двигателя из неподвижного состояния до скорости  $\omega_{\text{нач}2}$  (см. рис. 4.20) в уравнение (4.88) необходимо подставить  $M_{\text{нач}} = M_{\text{пуск}}$ ,  $M_{\text{кон}} = M_{\text{пер}}$  и  $M_{\text{уст}} = M_{\text{с}}$ .

$M_{\text{с}}$  – значение момента в точке физически установившегося режима работы электродвигателя.

#### 4.8.2. Асинхронный двигатель

Поскольку математическое описание электромеханических переходных процессов асинхронного электропривода на линейном участке его механической характеристики повторяет описание аналогичных процессов привода постоянного тока, то для расчета кривых  $I(t)$ ,  $M(t)$  и  $\omega(t)$  асинхронного электропривода можно воспользоваться формулами (4.83), (4.84), (4.85).

Если переходный процесс протекает на нелинейном участке механической характеристики асинхронного двигателя, то его определяют, например, так называемым методом пропорций. Сущность этого метода заключается в замене бесконечно малых приращений скорости  $d\omega$  и времени  $dt$  малыми конечными приращениями  $\Delta\omega$  и  $\Delta t$ .

График нелинейной механической характеристики асинхронного двигателя  $M_{\text{д}} = f(\omega)$  и линейной механической характеристики механизма  $M_{\text{с}} = f(\omega)$  приведен на рис. 4.21.

Построения для расчета переходных процессов методом конечных приращений ведутся в следующей последовательности:

- строятся механические характеристики электродвигателя  $M_{\text{д}} = f(\omega)$  и производственного механизма  $M_{\text{с}} = f(\omega)$ ;
- графически находится динамический момент электропривода  $M_{\text{дин}}(\omega) = M_{\text{д}}(\omega) - M_{\text{с}}(\omega)$ ;

- кривую динамического момента  $M_{\text{дин}}(\omega)$  заменяют ступенчатой с участками:

$$M_{\text{дин.ср.}i} = \frac{M_{\text{дин.макс}i} + M_{\text{дин.мин}i}}{2}, \quad (4.89)$$

где  $M_{\text{дин.макс}i}$ ,  $M_{\text{дин.мин}i}$  – максимальное и минимальное значения динамического момента на  $i$ -м участке. Точность расчетов тем выше, чем на большее число участков разбита кривая  $M_{\text{дин}}(\omega)$ ;

- определяют время переходного процесса, которое требуется для достижения скорости  $\omega_i = \omega_{\text{нач}i} + \Delta\omega_i$  на каждом участке:

$$\Delta t_i = J_{\Sigma} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{\text{дин.ср.}i}}, \text{ с}, \quad (4.90)$$

где  $\Delta\omega_i$  – приращение скорости на  $i$ -м участке. Полученные на отдельных участках элементарные промежутки времени суммируются для определения полного времени переходного процесса:

$$t = \sum_{i=1}^{i=m} \Delta t_i, \text{ с}, \quad (4.91)$$

где  $m$  – число участков разбиения механической характеристики;

- по графику электромеханической характеристики  $I_1 = f(\omega)$  определяют значения тока  $I_{1i}$ , соответствующие конечной угловой скорости  $\omega_i$  каждого участка.

Все производимые расчеты удобно представить в виде табл. 4.3.

Таблица 4.3

Участок	Конечная скорость на участке	Приращение скорости на участке	Среднее значение, $M_{\text{дин}i}$	Время п.п. на рассматриваемом участке, $\Delta t_i$	Время с начала п.п., $t_i$	Конечное значение $M_{\text{дв}}$ на участке	Конечное значение тока $I_1$ на участке
1	0	0	$M_{\text{дин}1}$	0	0	$M_{\text{п}}$	$I_{1\text{кз}}$
1–2	$\omega_1$	$\omega_1$	$M_{\text{дин}2}$	$t_1$	$t_1$	$M_2$	$I_{12}$
2–3	$\omega_2$	$\omega_2 - \omega_1$	$M_{\text{дин}3}$	$t_2$	$t_1 + t_2$	$M_3$	$I_{13}$

По итогам расчетов строятся кривые  $M_{\text{д}} = f(t)$ ,  $\omega = f(t)$ ,  $I_1 = f(t)$  за цикл работы. Расчетные данные используются далее для проверки

двигателя и основных элементов силовой цепи по нагреву и кратковременной перегрузке.

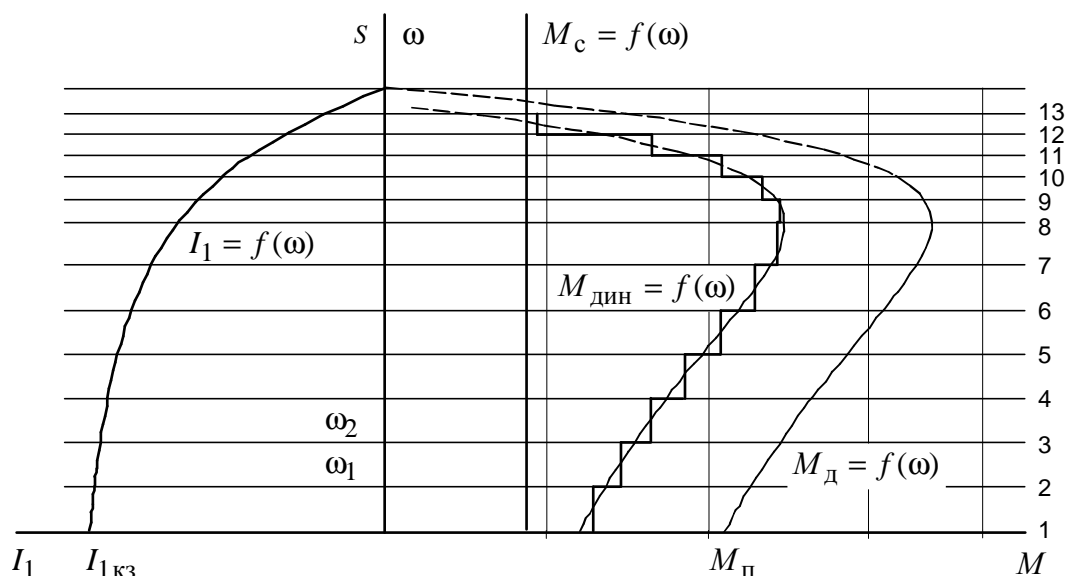


Рис. 4.21. Метод конечных приращений для построения графиков переходных процессов

#### 4.9. Проверка двигателя по нагреву и перегрузке

Проверка двигателя по нагреву производится на основе рассчитанной нагрузочной диаграммы электропривода и его режима работы.

Обычно применяются методы среднеквадратичного (эквивалентного) тока и момента. Среди этих методов в качестве основного следует применять метод эквивалентного тока и лишь в тех случаях, когда момент двигателя пропорционален току, проверку можно выполнять методом эквивалентного момента.

В общем виде эквивалентный ток двигателя за рабочий цикл можно вычислить по следующему уравнению:

$$I_э = \sqrt{\frac{\sum t_p + \sum t_{пп}}{\int_0^{\sum t_p + \sum t_{пп}} I^2(t) \cdot dt}}, \quad (4.92)$$

- где  $I_э$  – искомое значение эквивалентной величины тока, А;  
 $\sum t_p$  – суммарное время работы за цикл, с;  
 $\sum t_{пп}$  – суммарное время переходных процессов за цикл, с;  
 $t_i$  – время работы на  $i$ -ом участке, с;  
 $b_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -ом участке.

Суммарное время состоит из рабочего времени и интервала времени пауз при продолжительном режиме и только из рабочего времени при повторно-кратковременном и кратковременном режимах. Необходимо отметить, что при повторно-кратковременном и кратковременном режимах эквивалентные величины пересчитываются соответственно на каталожные значения продолжительности включения и длительности работы в соответствии с (4.6):

$$I_{\text{к}} = I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{э}}}{\text{ПВ}_{\text{к}}}}, \text{ А.} \quad (4.93)$$

Пересчитанная величина тока  $I_{\text{к}}$  сопоставляется с номинальной величиной тока  $I_{\text{н}}$  выбранного двигателя. При этом должно выполняться условие:

$$I_{\text{к}} \leq I_{\text{н}}, \quad (4.94)$$

где  $I_{\text{к}}$  – пересчитанная на каталожную эквивалентная величина тока, А;

$I_{\text{н}}$  – номинальное значение тока, А.

Асинхронный двигатель должен быть также проверен по допустимой нагрузке из условия, что:

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}} \leq \lambda, \quad (4.95)$$

где  $M_{\text{max}}$  – максимальное значение момента;

$M_{\text{н}}$  – номинальное значение момента;

$\lambda$  – допустимый коэффициент перегрузки двигателя по моменту.

Если окажется, что условия (4.94) или (4.95) не выполняются, то необходимо выбрать двигатель большей мощности из условия перегрузки.

#### 4.10. Разработка схемы управления электроприводом

Автоматизация процесса пуска двигателя значительно облегчает управление электроприводами, предотвращает возможные ошибки при пуске двигателя и ведет к повышению производительности механизмов.

На рис. 4.22 приведены графики переходных процессов скорости и тока при пуске двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени пусковых сопротивлений.

Анализ этих графиков показывает, что автоматическое выключение пусковых сопротивлений должно производиться в определенные моменты времени ( $t_1$  и  $t_2$ ), при определенных скоростях ( $\omega_{\text{п1}}$  и  $\omega_{\text{п2}}$ ) и оп-

ределенном токе  $I_{пер}$ . Очевидно, что управление пуском двигателя может осуществляться по *принципам времени, скорости и тока*.

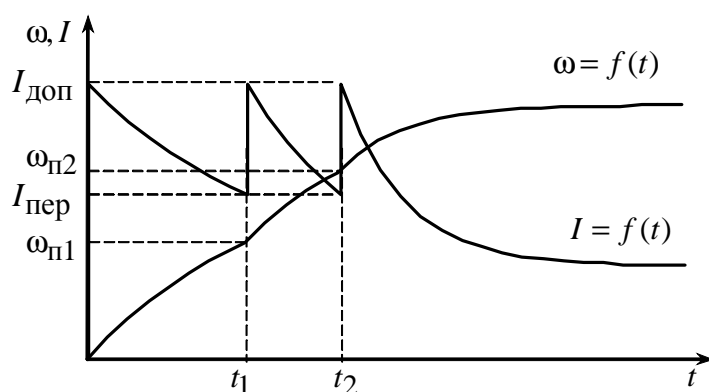


Рис. 4.22. Графики переходных процессов скорости и тока при пуске двигателя постоянного тока в две ступени

*Принцип времени* предполагает, что в электрической схеме имеются контролирующие время аппараты, которые в заданные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  формируют сигналы на закорачивание пусковых сопротивлений  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  (см. рис. 4.12).

*Принципы скорости и тока* предполагают, что электрическая схема электропривода автоматически контролирует соответственно скорость двигателя и его ток и при заданных значениях переменных формирует сигналы на закорачивание пусковых сопротивлений.

Кроме этих трех принципов управления, на практике получило распространение управление по принципу пути, мощности, счета операций и т. д.

В релейно-контакторных электроприводах наиболее распространенными датчиками времени, скорости и тока являются соответствующие реле или контакторы. Так, наиболее распространенным датчиком времени является реле времени, в качестве датчика тока чаще всего используют реле тока, обмотка которого непосредственно включается в якорную цепь двигателя. Датчиком скорости в релейно-контакторных схемах управления электроприводами служит непосредственно сама обмотка якоря двигателя, ЭДС которой при постоянном потоке двигателя пропорциональна скорости вращения  $E = c \cdot \omega$ . Контролирующими же ЭДС двигателя аппаратами являются силовые контакторы.

#### 4.10.1. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу скорости

Типовая схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения по принципу скорости приведена на рис. 4.23.

Схема работает следующим образом. После подачи напряжения на схему силовых цепей двигателя запитывается обмотка возбуждения  $LM$ . Пуск происходит при полном потоке двигателя  $\Phi_H$ .

При нажатии кнопки  $SB1$  получает питание обмотка контактора  $KM$ , он срабатывает и самоблокируется, т. е. параллельно кнопке  $SB1$  замыкается вспомогательный контакт  $KM$ . Кроме того, замыкается силовой контакт  $KM$  в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгоняться по первой пусковой характеристике (см. рис. 4.13) с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .

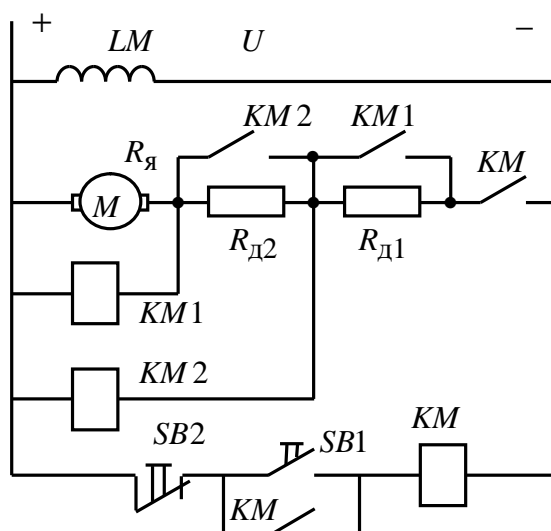


Рис. 4.23. Схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с управлением по принципу скорости

По мере разгона двигателя растет ЭДС обмотки якоря и соответственно увеличивается напряжение на контакторах  $KM1$  и  $KM2$ . При достижении двигателем скорости  $\omega_{п1}$  значение ЭДС на контакторе  $KM1$  становится достаточным для его срабатывания ( $U_{ср.км1} = c \cdot \omega_{п1} + I_{пер} \cdot R_{дв}$ ) и контактор  $KM1$  притягивает свой якорь. Замыкается контакт  $KM1$ , шунтирующий резистор  $R_{д1}$ , и двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 2. При скорости  $\omega_{п2}$  напряжение на контакторе  $KM2$ , равное  $U_{ср.км2} = c \cdot \omega_{п2} + I(R_{дв} + R_{д1})$ ,

становится достаточным для его срабатывания. Контакт  $KM2$  притягивает свой якорь, замыкается контакт  $KM2$ , шунтирующий резистор  $R_{д2}$ , двигатель переходит на естественную характеристику  $\beta$  и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{y3}$ , определяемой нагрузкой  $I_c$ .

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку  $SB2$  «Стоп». Контакт  $KM$  потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя в данном случае происходит *выбегом*, т. е. за счет потерь в подшипниках двигателя, в кинематике производственного механизма, на вентиляцию в двигателе.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  при пуске двигателя приведены на рис. 4.22.

Недостатки данной схемы заключаются в возможном перегорании пусковых резисторов при застревании двигателя на пусковой характеристике при увеличении нагрузки более  $I_{пер}$ , в неточном срабатывании контакторов при холодном и нагретом состояниях катушек, а также в том, что случайное увеличение напряжения сети во время пуска вызывает увеличение тока якоря.

#### **4.10.2. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу времени**

Схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения по принципу времени приведена на рис. 4.24.

После подачи напряжения на схему силовых цепей запитывается обмотка возбуждения двигателя  $LM$ . Пуск происходит при полном потоке двигателя  $\Phi_n$ . Через размыкающий контакт контактора  $KM$  получает питание обмотка реле времени  $KT1$ . Реле  $KT1$ , включившись, разрывает своим размыкающим контактом  $KT1$  цепи питания контакторов  $KM1$  и  $KM2$ . Схема подготовлена к пуску двигателя.

При нажатии кнопки  $SB1$  получает питание обмотка контактора  $KM$ , он срабатывает, самоблокируется и замыкает свой вспомогательный контакт  $KM$  в цепи питания контакторов  $KM1$  и  $KM2$ , однако они не включаются, т. к. разорвана цепь их питания размыкающим контактом реле времени  $KT1$ . Замыкается силовой контакт  $KM$  в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгон по первой пусковой характеристике –  $I$  (см. рис. 4.13) с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ .



От падения напряжения на резисторе  $R_{д1}$  включается реле времени  $KT2$  и размыкает свой размыкающий контакт  $KT2$  в цепи питания контактора  $KM2$ . Кроме того, размыкающий контакт  $KM$  разрывает цепь питания реле времени  $KT1$  и оно начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по первой пусковой характеристике (см. рис. 4.13).

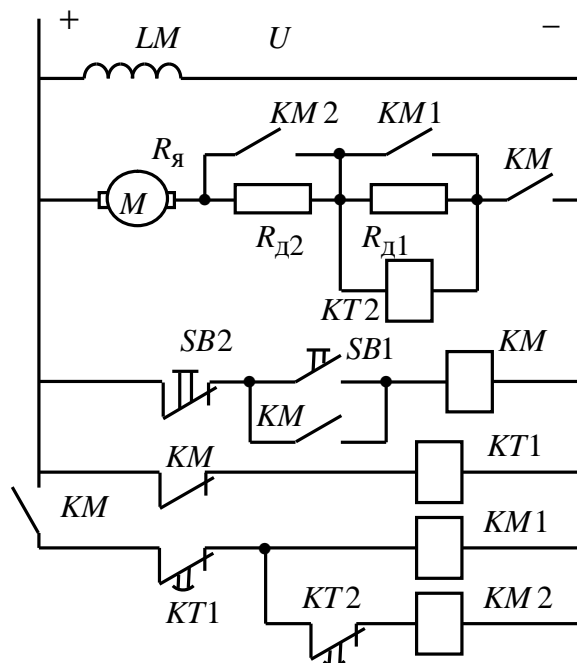


Рис. 4.24. Схема резисторного пуска двигателя постоянного тока с управлением по принципу времени

По истечении времени  $t_1$  размыкающий контакт реле времени  $KT1$  замыкается. Получает питание катушка контактора  $KM1$ , он, включившись, своим замыкающим контактом  $KM1$  шунтирует первое пусковое сопротивление  $R_{д1}$ . Двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 2 (см. рис. 4.13), теряет питание реле времени  $KT2$  и своим размыкающим контактом  $KT2$  начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по второй пусковой характеристике. По истечении этой выдержки времени, в момент времени  $t_2$  (см. рис. 4.22), размыкающий контакт  $KT2$  замыкается. Получает питание обмотка контактора  $KM2$ , замыкается контакт  $KM2$ , шунтирующий резистор  $R_{д2}$ , двигатель переходит на естественную характеристику – 3 (см. рис. 4.13) и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{у3}$  определяемой нагрузкой  $I_c$ .

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку  $SB2$  «Стоп». Контактор  $KM$  потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя происходит *выбегом*.

Достоинством схемы управления, осуществляющей пуск двигателя в функции времени, является отсутствие опасности застревания двигателя на пусковых характеристиках. Простота и надежность в работе, также как и возможность применения однотипных реле времени, привели к широкому применению электроприводов, управляемых в функции времени.

Выбор принципа автоматизации управления процессами пуска, торможения и регулирования скорости в релейно-контакторных системах управления электроприводами определяется особенностями их работы и условиями эксплуатации. Приведенные на рис. 4.23 и рис. 4.24 принципиальные схемы управления процессами пуска электроприводов постоянного тока разработаны для идеального электропривода. В реальном электроприводе изменяется нагрузка на валу электродвигателя, температура окружающей среды и элементов электропривода, моменты инерции механизма, напряжение питания и другие параметры (давление, влажность и т. д.). Изменение этих параметров необходимо учитывать при разработке системы управления электроприводом и ее защиты.

## 5. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В табл. 5.1 приведены типы применяемых электродвигателей по вариантам, в табл. 5.2 – варианты тахограмм производственных механизмов за цикл работы, а в табл. 5.3 – варианты нагрузки, создаваемой производственным механизмом.

Таблица 5.1

№ варианта	Тип применяемого электродвигателя
1	Асинхронный трехфазный с фазным ротором
2	Постоянного тока независимого возбуждения

Таблица 5.2

№ варианта	Частота вращения механизма $n_1$ , об/мин	Время работы $t_{p1}$ , с	Частота вращения механизма $n_2$ , об/мин	Время работы $t_{p2}$ , с	Время паузы $t_0$ , с
01	50	25	-20	30	120
02	100	15	-35	18	45
03	25	16	50	24	40
04	20	20	80	30	110
05	-10	30	110	40	100
06	150	25	-20	30	120
07	-400	15	135	18	45
08	-125	16	50	24	40
09	-120	20	80	30	110
10	-40	30	220	40	100
11	50	30	80	15	120
12	100	20	-70	30	50
13	20	25	60	25	100
14	40	50	-20	10	60
15	10	60	100	90	30

Таблица 5.3

№ варианта	Момент механизма, Н·м	Характер нагрузки	КПД передачи при максимальной частоте вращения	Момент инерции механизма, кг·м <sup>2</sup>
1	500	активная	0,95	20
2	1500	реактивная	0,97	60
3	250	активная	0,95	50
4	800	реактивная	0,97	40

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для каких целей и в каких системах может быть применен спроектированный Вами электропривод?
2. Обоснуйте произведенный Вами выбор силовой схемы электропривода.
3. Объясните приведенную в расчетно-пояснительной записке тахограмму и нагрузочную диаграмму.
4. Что представляет собой коэффициент ПВ, %?
5. Объясните физический смысл коэффициента  $c$ .
6. Дайте краткую характеристику повторно-кратковременному режиму работы.
7. Объясните проведенный расчет скольжений по ступеням регулирования.
8. Покажите графически отличие активной и реактивной нагрузок.
9. Какой ток покажет амперметр, включенный в цепь ротора на первой регулировочной характеристике, при  $s = 0,5$ ?
10. Можно ли с помощью выбранного Вами способа регулирования получить угловые скорости выше номинальных?
11. Какое передаточное отношение редуктора является оптимальным?
12. Поясните, что следует понимать под диапазоном, направлением и плавностью регулирования скорости.
13. Укажите порядок выбора мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.
14. Как пересчитать мощность двигателя на иную продолжительность включения?
15. Как следует поступить, если полученное расчетом эквивалентное значение тока больше номинального тока двигателя?
16. Как проверить двигатель на перегрузочную способность?
17. Какой вид торможения применяется при работе Вашего привода? Назовите и дайте краткую характеристику способам электрического торможения.
18. Напишите уравнение движения электропривода для двигательного и тормозного режимов при реактивном моменте сопротивления.
19. Как привести к валу двигателя момент сопротивления и момент инерции механизма?
20. Каковы особенности расчета переходных режимов асинхронных двигателей в сравнении с двигателями независимого (параллельного) возбуждения?

21. По каким показателям проверяется правильность выбора двигателя?
22. Укажите порядок расчета тока статора двигателя в функции угловой скорости.
23. Чему равен ток статора асинхронного двигателя при скольжении, равном нулю?
24. Чему равна частота тока ротора при  $s = 0,5$ ?
25. Чем вызвана необходимость ограничения бросков тока и момента при пусках, реверсах, торможениях двигателей постоянного тока?
26. Поясните физический смысл и принцип графического определения постоянных времени нагрева и охлаждения двигателя.

## 7. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Задание на проектирование: Разработать электропривод производственного механизма, удовлетворяющего следующим техническим условиям и требованиям:

1. В качестве регулируемого электропривода принять привод постоянного тока индивидуального изготовления с параметрическим регулированием скорости изменением активного сопротивления в цепи обмотки якоря.

2. Кинематическая схема электропривода имеет вид, представленный на рис. 7.1.

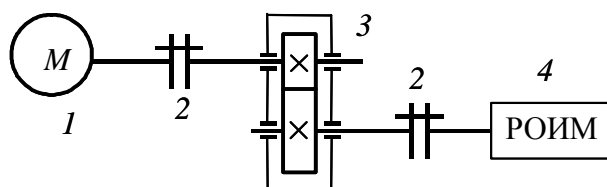


Рис. 7.1. Кинематическая схема электропривода:  
1 – двигатель постоянного тока; 2 – муфта; 3 – редуктор;  
4 – рабочий орган исполнительного механизма

3. Электропривод должен обеспечить следующие технологические частоты вращения рабочего органа производственного механизма и время работы с этими частотами вращения:

Первая технологическая частота вращения механизма  $n_{M1} = 108 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

Время работы на первой технологической частоте вращения  $t_{p1} = 65$  с.

Вторая технологическая частота вращения механизма  $n_{M2} = -120 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

Время работы на второй технологической частоте вращения  $t_{p2} = 90$  с.

Время паузы  $t_{п} = 80$  с.

Момент сопротивления механизма  $M_{\text{мех}} = 2500$  Н · м.

Характер нагрузки – активная.

КПД передачи при максимальной частоте вращения – 0,96.

Момент инерции механизма – 32 кг · м<sup>2</sup>.

## 7.1. Выбор типа электропривода

Основными факторами, определяющими род тока, тип и конструктивное исполнение двигателя, являются:

- показатели регулирования скорости (диапазон, плавность, стабильность скорости и т. д.);
- режим работы производственного механизма;
- производительность и надежность установки;
- основные затраты и эксплуатационные расходы на электрооборудование.

В данной работе расчет электропривода производится с двигателем постоянного тока независимого возбуждения без учета технико-экономических показателей, на основании технического задания.

## 7.2. Построение диаграмм производственного механизма

### Построение диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы производственного механизма

Для построения диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы рассчитаем время полного цикла работы электропривода и угловые скорости производственного механизма.

Время цикла работы механизма:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{пауз}},$$

где  $t_{\text{р1}}$  – время работы с частотой вращения  $n_1 = 108$  об/мин;

$t_{\text{р2}}$  – время работы с частотой вращения  $n_2 = -120$  об/мин;

$t_{\text{пауз}}$  – время паузы;

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{пауз}} = 65 + 90 + 80 = 235 \text{ с.}$$

Произведем пересчет частот вращения  $n_i$  рабочего органа производственного механизма на угловые скорости  $\omega_i$  в соответствии с выражением:

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30}.$$

Первая технологическая скорость механизма:

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3,1415 \cdot 108}{30} = 11,31 \text{ рад/с.}$$

Вторая технологическая скорость механизма:

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = \frac{3,1415 \cdot (-120)}{30} = -12,57 \text{ рад/с.}$$

По данным расчетов произведем построение диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы производственного механизма, результаты построений приведены на рис. 7.2 и рис. 7.3.

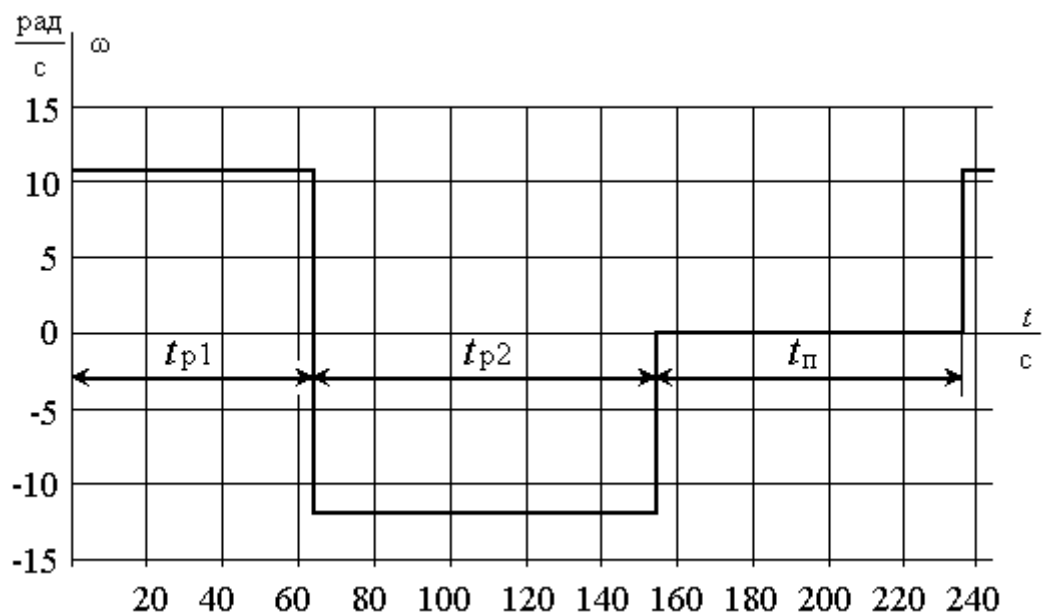


Рис. 7.2. Диаграмма скорости производственного механизма

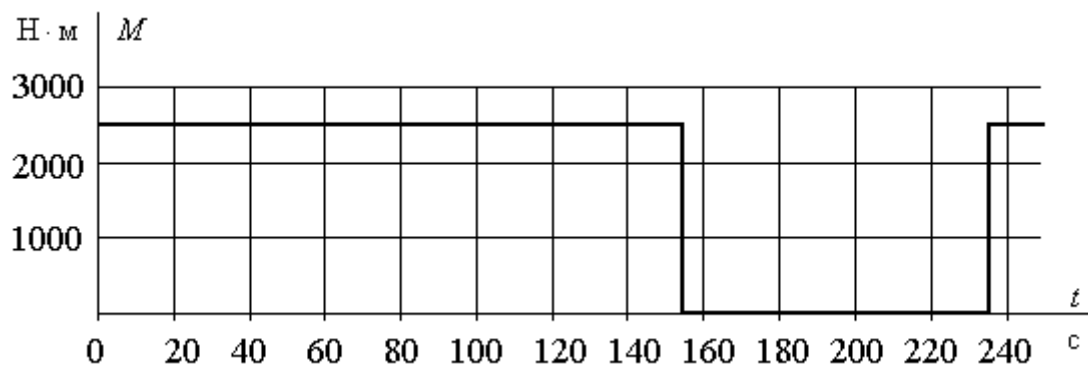


Рис. 7.3. Нагрузочная диаграмма производственного механизма для активной нагрузки



### 7.3. Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу

Анализ диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы производственного механизма показывает, что рассматриваемый электропривод работает в повторно-кратковременном режиме работы.

Для повторно-кратковременного режима работы электродвигателя последовательность выбора двигателя по мощности следующая:

По нагрузочной диаграмме механизма (нагрузки отнесены к валу механизма) определяется среднеквадратичное значение мощности за время работы с помощью формулы [1]:

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( \frac{P_i \cdot \omega_{\text{max}}}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_{\text{pi}}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{\text{pi}}}}, \text{ кВт},$$

где  $m$  – число рабочих участков в цикле;

$P_i$  – мощность на  $i$ -м интервале;

$t_{\text{pi}}$  – продолжительность  $i$ -го интервала;

$\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -м интервале, соответствующий значению угловой скорости  $\omega_i$  на этом интервале;

$\omega_{\text{max}}$  – максимальная скорость производственного механизма.

При найденных угловых скоростях  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и заданном моменте  $M_i$  производственного механизма определяем мощность при работе на каждой технологической скорости:

$$P_i = M_i \cdot \omega_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт};$$

$$P_1 = M_1 \cdot \omega_1 \cdot 10^{-3} = 2500 \cdot 11,31 \cdot 10^{-3} = 28,274 \text{ кВт};$$

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 \cdot 10^{-3} = 2500 \cdot 12,57 \cdot 10^{-3} = 31,416 \text{ кВт}.$$

Приблизительно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной [1]:

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{\text{max}}},$$

где  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре.

Примерные значения коэффициента  $\beta_0$  для двигателей различного исполнения приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Исполнение двигателя	$\beta_0$
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ÷ 0,98
Закрытый самовентилируемый	0,45 ÷ 0,55
Самовентилируемый защищенный	0,25 ÷ 0,35

Для двигателя постоянного тока, выполненного в закрытом самовентилируемом исполнении, коэффициент ухудшения теплоотдачи  $\beta_0 = 0,45 \div 0,55$ . Принимаем  $\beta_0 = 0,5$ .

Тогда для каждой из технологических скоростей:

$$b_1 = b_0 + (1 - b_0) \cdot \frac{w_1}{w_{\max}} = 0,5 + (1 - 0,5) \frac{11,31}{12,57} = 0,95;$$

$$b_2 = b_0 + (1 - b_0) \cdot \frac{w_2}{w_{\max}} = 0,5 + (1 - 0,5) \frac{12,57}{12,57} = 1.$$

Среднеквадратичное значение мощности за время работы:

$$P_3 = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_1 \cdot \omega_{\max}}{\omega_1}\right)^2 \cdot t_{p1} + \left(\frac{P_2 \cdot \omega_{\max}}{\omega_2}\right)^2 \cdot t_{p2}}{\beta_1 \cdot t_{p1} + \beta_2 \cdot t_{p2}}} = \sqrt{\frac{28,3^2 \cdot 65 + 31,4^2 \cdot 90}{0,95 \cdot 65 + 1 \cdot 90}} = 30,46 \text{ кВт.}$$

Найдем расчетную продолжительность включения:

$$ПВ_{\text{расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{j=1}^n t_{пj}} \cdot 100 \%,$$

где  $t_{pi}$  – продолжительность  $i$ -го интервала времени работы в цикле;

$m$  – число рабочих интервалов в цикле;

$t_{пj}$  – продолжительность  $j$ -го интервала времени паузы в цикле;

$n$  – число пауз в цикле.

В данном случае  $n = 1$ , тогда

$$ПВ_{\text{расч}} = \frac{65 + 90}{65 + 90 + 80} \cdot 100 \% = 65,96 \%$$

Пересчитаем среднеквадратичную мощность на ближайшую каталожную продолжительность включения:

$$P_k = P_3 \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{расч}}}{ПВ_k}}, \text{ кВт,}$$

где  $PВ_k$  – ближайшая к расчетной каталожная продолжительность включения. Каталожная продолжительность включения выбирается из ряда номинальных значений: 15%, 25%, 40%, 60%, 100%.

Проводим расчеты для  $PВ_{к1} = 60\%$  и  $PВ_{к2} = 100\%$ .

Каталожные мощности:

$$P_{к1} = P_{э} \cdot \sqrt{\frac{PВ_{э}}{PВ_{к1}}} = 30,459 \cdot \sqrt{\frac{65,96}{60}} = 31,936 \text{ кВт};$$

$$P_{к2} = P_{э} \cdot \sqrt{\frac{PВ_{э}}{PВ_{к2}}} = 30,459 \cdot \sqrt{\frac{65,96}{100}} = 24,737 \text{ кВт}.$$

Определяем расчетную мощность двигателя:

$$P_{расч} = P_{к} \cdot \frac{k_3}{\eta_{п}}, \text{ кВт},$$

где  $k_3 = 1,1 \div 1,3$  – коэффициент запаса (принимаем  $k_3 = 1,1$ );

$\eta_{п}$  – коэффициент полезного действия передачи;  $h_{п} = 0,96$ ;

$$P_{расч1} = P_{к1} \cdot \frac{k_3}{h_{п}} = \frac{31,936 \cdot 1,1}{0,96} = 36,593 \text{ кВт};$$

$$P_{расч2} = P_{к2} \cdot \frac{k_3}{h_{п}} = \frac{24,737 \cdot 1,1}{0,96} = 28,345 \text{ кВт}.$$

По каталогу выбирается несколько электродвигателей ближайшей большей мощности с различными номинальными частотами вращения:

Тихоходного исполнения:

МП-62;

$PВ = 60\%$ ;

$P_H = 46 \text{ кВт}$ ;

$n_H = 580 \text{ об/мин}$ ;

$U_H = 220 \text{ В}$ ;

$I_H = 231 \text{ А}$ ;

$(R_{я} + R_{дп})_{+15 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0,033 \text{ Ом}$ ;

$J = 5,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

МП-52;

$PВ = 100\%$ ;

$P_H = 33 \text{ кВт}$ ;

$n_H = 650 \text{ об/мин}$ ;

$U_H = 220 \text{ В}$ ;

$I_H = 168 \text{ А}$ ;

$(R_{я} + R_{дп})_{+15 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0,0495 \text{ Ом}$ ;

$J = 3,03 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Быстроходного исполнения:

ДП-52;

ПВ = 60% ;

$P_H = 42$  кВт;

$n_H = 970$  об/мин;

$I_H = 214$  А;

$(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}})_{+15} \text{ } \omega_C = 0,006$  Ом;

$J = 1,87$  кг·м<sup>2</sup>.

ДП-42;

ПВ = 100% ;

$P_H = 32$  кВт;

$n_H = 1000$  об/мин;

$I_H = 165$  А;

$(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}})_{+15} \text{ } \omega_C = 0,011$  Ом;

$J = 1,05$  кг·м<sup>2</sup>.

Для каждого двигателя вычислим расчетное передаточное отношение (число) редуктора:

$$i_{pi} = \frac{\omega_{\text{нд}}}{|\omega_{\text{max м}}|},$$

где  $\omega_{\text{нд}}$  – номинальная скорость двигателя;

$\omega_{\text{max м}}$  – максимальная скорость производственного механизма.

Номинальные скорости двигателя:

$$w_{\text{нд1}} = \frac{n_{\text{д1}} \cdot \pi}{30} = \frac{580 \cdot 3,14}{30} = 60,737 \text{ рад/с};$$

$$w_{\text{нд2}} = \frac{n_{\text{д2}} \cdot \pi}{30} = \frac{650 \cdot 3,14}{30} = 68,068 \text{ рад/с};$$

$$w_{\text{нд3}} = \frac{n_{\text{д3}} \cdot \pi}{30} = \frac{970 \cdot 3,14}{30} = 101,578 \text{ рад/с};$$

$$w_{\text{нд4}} = \frac{n_{\text{д4}} \cdot \pi}{30} = \frac{1000 \cdot 3,14}{30} = 104,72 \text{ рад/с}.$$

Для каждого из выбранных двигателей вычислим расчетное передаточное отношение (число) редуктора:

$$i_{p1} = \frac{w_{\text{нд1}}}{|\omega_{\text{max м}}|} = \frac{60,737}{12,57} = 4,83;$$

$$i_{p2} = \frac{w_{\text{нд2}}}{|\omega_{\text{max м}}|} = \frac{68,068}{12,57} = 5,417;$$

$$i_{p3} = \frac{w_{\text{нд3}}}{|\omega_{\text{max м}}|} = \frac{101,578}{12,57} = 8,083;$$

$$i_{p4} = \frac{w_{\text{нд4}}}{|\omega_{\text{max м}}|} = \frac{104,72}{12,57} = 8,333.$$

Промышленность выпускает одно-, двух- и трехступенчатые редукторы с передаточным числом из стандартного ряда [3]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,1; 8,0; 9,0.

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора можно найти следующим образом:

$$i_{\text{ст р}} = i_{\text{ст } i} \cdot 10^x,$$

где  $i_{\text{ст } i}$  – стандартное передаточное число редуктора;

$x$  – целое число.

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается ближайшее меньшее к расчетному:

$$i_{\text{ст р}} \leq i_{\text{р } i},$$

поэтому стандартные передаточные отношения редукторов составят:

$$i_{\text{ст р}1} = 4,5;$$

$$i_{\text{ст р}2} = 5;$$

$$i_{\text{ст р}3} = 8;$$

$$i_{\text{ст р}4} = 8.$$

Для каждого двигателя найдем оптимальное по условию минимизации времени пуска передаточное отношение редуктора:

$$i_{\text{опт } i} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{k \cdot J_{\text{дв}}}},$$

где  $J_{\text{м}}$  – момент инерции производственного механизма;

$J_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора двигателя;

$k = 1,05 \div 1,3$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора. Принимаем  $k = 1,1$ :

$$i_{\text{опт } 1} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{k \cdot J_{\text{дв}1}}} = \sqrt{\frac{32}{1,1 \cdot 5,5}} = 2,3$$

$$i_{\text{опт } 2} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{k \cdot J_{\text{дв}2}}} = \sqrt{\frac{32}{1,1 \cdot 3,03}} = 3,099;$$

$$i_{\text{опт } 3} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{k \cdot J_{\text{дв}3}}} = \sqrt{\frac{32}{1,1 \cdot 1,87}} = 3,944;$$

$$i_{\text{опт } 4} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{k \cdot J_{\text{дв}4}}} = \sqrt{\frac{32}{1,1 \cdot 1,05}} = 5,264.$$

Для каждого двигателя найдем отношение стандартного передаточного отношения редуктора к оптимальному передаточному отношению:

$$\Theta_1 = \frac{i_{\text{ст.р1}}}{i_{\text{опт 1}}} = \frac{4,5}{2,3} = 1,957;$$

$$\Theta_2 = \frac{i_{\text{ст.р2}}}{i_{\text{опт 2}}} = \frac{5}{3,099} = 1,613;$$

$$\Theta_3 = \frac{i_{\text{ст.р3}}}{i_{\text{опт 3}}} = \frac{8}{3,944} = 2,028;$$

$$\Theta_4 = \frac{i_{\text{ст.р4}}}{i_{\text{опт 4}}} = \frac{8}{5,264} = 1,519.$$

Двигатель с  $\Theta_i$ , наиболее приближенной к единице, принимается в качестве приводного. Исходя из полученных данных, для дальнейших расчетов выбираем двигатель быстрого исполнения ДП-42, ПВ = 100%.

#### 7.4. Построение электромеханических характеристик электродвигателя

Для построения электромеханической характеристики двигателя независимого возбуждения, естественной или реостатной, достаточно знать лишь две ее точки, поскольку все электромеханические характеристики теоретически представляют собой прямые линии. Эти две точки для каждой характеристики могут быть любыми, однако построение каждой из рабочих электромеханических характеристик удобно производить по точкам, одна из которых соответствует статическому току двигателя и технологической скорости ( $I = I_{\text{ст}}$  и  $\omega = \omega_{\text{ст1}}$ ), другая – скорости идеального холостого хода при токе якоря, равном нулю ( $I = 0$  и  $\omega = \omega_0$ ).

Рассчитаем сопротивление якорной цепи электродвигателя в нагретом состоянии (при температуре двигателя, равной  $75^\circ\text{C}$ ):

$$R_{\text{дв.гор}} = (1 + 0,004 \cdot t) \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}})_{+15^\circ\text{C}} = (1 + 0,004 \cdot 60) \cdot 0,011 = 0,014 \text{ Ом},$$

где  $t$  – перегрев обмоток двигателя относительно начальной температуры в  $15^\circ\text{C}$

Определим номинальную скорость двигателя:

$$w_{\text{н}} = \frac{p \cdot n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Найдем коэффициент ЭДС и электромагнитного момента (конструктивная постоянная двигателя) в номинальном режиме работы:

$$c_H = \frac{U_H - I_H \cdot R_{\text{дв.гор}}}{w_H} \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}},$$

где  $\omega_H$  – номинальная угловая скорость двигателя,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$U_H$  – номинальное напряжение обмотки якоря, В;

$I_H$  – номинальный ток обмотки якоря, А;

$$c_H = \frac{U_H - I_H \cdot R_{\text{дв.гор}}}{w_H} = \frac{220 - 165 \cdot 0,014}{104,72} = 2,079.$$

Рассчитаем номинальный электромагнитный момент двигателя и номинальный механический момент, развиваемый двигателем на валу:

$$M_{\text{эм.н}} = c_H \cdot I_H = 2,079 \cdot 165 = 343,093 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_H = \frac{P_H}{w_H} = \frac{32000}{104,72} = 305,577 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вычислим момент потерь двигателя в номинальном режиме:

$$M_{\text{пот}} = M_{\text{эм.н}} - M_H = 343,093 - 305,577 = 37,516 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Примем допущение, что момент потерь двигателя остается постоянным во всем рабочем диапазоне частот вращения двигателя.

Для определения статического тока необходимо рассчитать статический момент механизма, приведенный к валу двигателя. При активном характере нагрузки в двигательном режиме (I квадрант) момент статический определяется по выражению:

$$M_{\text{сд}} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}} + M_{\text{пот}}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $M_{\text{мех}}$  – момент механизма, Н·м;

$M_{\text{пот}}$  – момент потерь, Н·м;

$i_{\text{ст.р}}$  – стандартное передаточное число редуктора;

$\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи при максимальной частоте вращения;

В генераторном режиме работы (рекуперация, противовключение, IV квадрант), момент статический определяется согласно выражению:

$$M_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{п}}}{i_{\text{ст.р}}} - M_{\text{пот}}, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вычислим статические моменты для первой и второй рабочей точек:

$$M_{\text{с1}} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}} + M_{\text{пот}} = \frac{2500}{0,96 \cdot 8} + 37,516 = 363,037 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{c2} = \frac{M_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{п}}}{i_{\text{ст.р}}} - M_{\text{пот}} = \frac{2700 \cdot 0,96}{8} - 37,516 = 262,484 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для определения значения статического тока якоря двигателя выполним промежуточные вычисления.

Определим статический ток якоря двигателя, соответствующий нагрузке на первой ступени в двигательном режиме:

$$I_{c1} = \frac{M_{c1}}{c} = \frac{363,037}{2,079} = 174,591 \text{ А}.$$

Определим статический ток якоря двигателя, соответствующий нагрузке на второй рабочей ступени в генераторном режиме:

$$I_{c2} = \frac{M_{c2}}{c} = \frac{262,484}{2,079} = 126,234 \text{ А}.$$

Найдем скорость идеального холостого хода:

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{c} = \frac{220}{2,079} = 105,802 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Определим технологические скорости вращения двигателя:

$$\omega_{p1} = \frac{p \cdot n_{\text{м1}} \cdot i_{\text{ст.р}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 108 \cdot 8}{30} = 90,478 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{p2} = \frac{p \cdot n_{\text{м2}} \cdot i_{\text{ст.р}}}{30} = \frac{3,14 \cdot (-120) \cdot 8}{30} = -100,531 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

По расчетным значениям технологических скоростей вращения двигателя  $\omega_{pi}$ , статическим токам якоря двигателя  $I_{ci}$  и скорости идеального холостого хода двигателя  $\omega_0$  необходимо построить электро-механические характеристики.

Для двигателей постоянного тока пуск, реверс, торможение, а также регулирование скорости должно осуществляться при наложенных на ток и момент ограничениях. В электроприводах постоянного тока с релейно-контакторной схемой управления ток якоря ограничивают введением на время пуска в цепь обмотки якоря двигателя добавочных сопротивлений.

Максимальный ток якоря двигателя  $I_{\text{дв.мах}}$  следует ограничить из условия удовлетворительной коммутации на коллекторе на уровне

$$I_{\text{дв.мах}} \leq I_{\text{дв.н}} \cdot \lambda_I,$$

где  $\lambda_I$  – коэффициент допустимой перегрузки двигателя по току. Обычно принимают  $\lambda_I = 2,2$ .

Найдем максимально допустимый ток якоря выбранного двигателя:



$$I_{\text{дв.мах}} \leq I_{\text{дв.н}} \cdot \lambda_I = 165 \cdot 2,2 = 363 \text{ А.}$$

В качестве примера рассмотрим порядок построения пусковых характеристик для выхода в первую рабочую точку (см. рис. 7.4):

- строится первая  $I$  технологическая характеристика электропривода;
- строится первая пусковая электромеханическая характеристика – 3 электропривода. Характеристика 3 проходит через две точки: скорость идеального холостого хода при токе якоря, равном нулю ( $\omega_0$ ,  $I = 0$ ), и допустимый ток двигателя  $I_{\text{дв.мах}}$  при нулевой скорости;
- определяется ток переключения  $I_{\text{пер}}$ , который принимается из условия

$$I_{\text{пер}} \geq (1,1 \div 1,2) \cdot I_{\text{н}};$$

- в точке с координатами ( $I_{\text{пер}}$ ,  $\omega_{\text{п1}}$ ) происходит замыкание первого пускового сопротивления  $R_{\text{д1}}$  и двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 4. Таким образом, характеристика 4 проходит через две точки: скорости идеального холостого хода  $\omega_0$  при токе якоря, равном нулю ( $I = 0$ ), и допустимого тока  $I_{\text{дв.мах}}$  при скорости, равной  $\omega_{\text{п1}}$ .

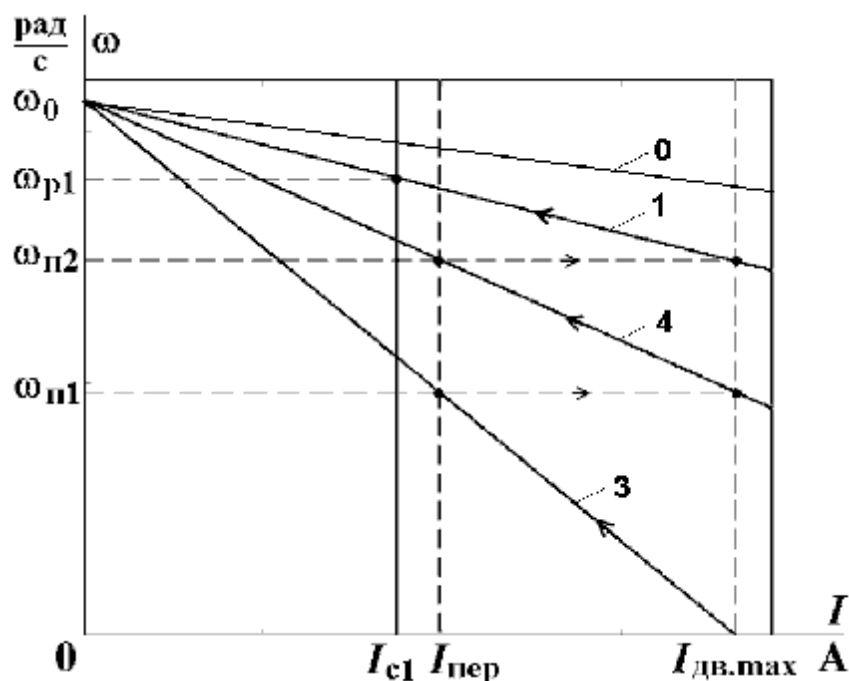


Рис. 7.4. Электромеханические характеристики электропривода:

- 0 – естественная электромеханическая характеристика;
- 1 – первая технологическая электромеханическая характеристика;
- 3 – первая пусковая электромеханическая характеристика электропривода;
- 4 – вторая пусковая электромеханическая характеристика электропривода

Замыкание второго пускового сопротивления  $R_{д2}$  также необходимо производить при токе переключения  $I_{пер}$ .

Необходимо обратить внимание, чтобы на заключительном этапе разгона двигателя при переходе с последней пусковой характеристики на первую рабочую характеристику, бросок тока не превышал допустимый ток двигателя  $I_{дв. max}$ . Если это требование не выполняется, то ток переключения  $I_{пер}$  необходимо поменять, несколько увеличив или уменьшив его. Если ток переключения становится меньше  $1,1 \cdot I_H$ , то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений. Для нашего примера:

$$I_{пер} = 1,206 \cdot I_{пер} = 199 \text{ А.}$$

Из уравнения электромеханической характеристики по заданным  $w_{pi}$ ,  $I_i$  и известным  $R_{дв. гор}$ ,  $c_H$ ,  $U_H$  найдем добавочные сопротивления  $R_i$  для каждой из технологических характеристик (характеристики 1, 2 на рис. 7.6):

$$R_i = \frac{U_H - w_{pi} \cdot c_H}{I_{ci}} - R_{дв. гор}, \text{ Ом,}$$

где  $w_{pi}$  – угловая скорость двигателя на  $i$ -ой характеристике;

$I_{ci}$  – статический ток двигателя на  $i$ -ой характеристике.

$$R_1 = \frac{U_H - w_{p1} \cdot c_H}{I_{c1}} - R_{дв. гор} = \frac{220 - 90,478 \cdot 2,079}{174,591} - 0,014 = 0,169 \text{ Ом;}$$

$$R_2 = \frac{U_H - w_{p2} \cdot c_H}{I_{c2}} - R_{дв. гор} = \frac{220 - (-100,531) \cdot 2,079}{126,234} - 0,014 = 3,385 \text{ Ом.}$$

Из уравнения электромеханической характеристики по известным  $R_{дв. гор}$ ,  $c_H$ ,  $U_H$  и  $\omega = 0$  найдем пусковое сопротивление  $R_{п3}$  для первой пусковой характеристики 3, рис. 7.6, а также угловую скорость  $w_{пер1}$ , по достижении которой необходимо осуществить переход на вторую пусковую характеристику:

$$R_{п3} = \frac{U_H - 0 \cdot c_H}{I_{дв. max}} - R_{дв. гор} = \frac{220}{363} - 0,014 = 0,592 \text{ Ом;}$$

$$w_{\text{пер1}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{пер}} \cdot (R_{\text{дв. гор}} + R_{\text{п1}})}{c_{\text{н}}} = \frac{220 - 199 \cdot (0,014 + 0,592)}{2,079} = 47,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Далее, по известным  $R_{\text{дв. гор}}$ ,  $c_{\text{н}}$ ,  $U_{\text{н}}$  и  $w_{\text{пер1}}$  найдем пусковое сопротивление  $R_{\text{п4}}$  для второй пусковой характеристики 4, рис. 7.6, а также угловую скорость  $w_{\text{пер2}}$ , по достижении которой необходимо осуществить переход на другую характеристику:

$$R_{\text{п4}} = \frac{U_{\text{н}} - w_{\text{пер1}} \cdot c_{\text{н}}}{I_{\text{дв. max}}} - R_{\text{дв. гор}} = \frac{220 - 47,8 \cdot 2,079}{363} - 0,014 = 0,317 \text{ Ом};$$

$$w_{\text{пер2}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{пер}} \cdot (R_{\text{дв. гор}} + R_{\text{п2}})}{c_{\text{н}}} = \frac{220 - 199 \cdot (0,014 + 0,317)}{2,079} = 74 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Добавочное сопротивление для третьей пусковой характеристики определяется по следующему выражению:

$$R_{\text{п5}} = \frac{U_{\text{н}} - w_{\text{пер2}} \cdot c_{\text{н}}}{I_{\text{дв. max}}} - R_{\text{дв. гор}} = \frac{220 - 74,005 \cdot 2,079}{363} - 0,014 = 0,169 \text{ Ом};$$

Очевидно, что при правильно подобранном токе переключения  $I_{\text{пер}}$ , номинал добавочного сопротивления для третьей пусковой характеристики  $R_{\text{п5}}$  совпадает с номиналом добавочного сопротивления для работы на первой рабочей ступени  $R_1$ . Поэтому дальнейший разгон двигателя будем осуществлять по электромеханической характеристике 1, рис. 7.6 первой рабочей ступени, то есть с введением в цепь якоря сопротивления  $R_{\text{п5}} = R_1 = 0,169 \text{ Ом}$ .

Таким образом, добавочные сопротивления для технологических и пусковых характеристик найдены.

Переход с первой рабочей точки во вторую рабочую точку будем осуществлять с помощью динамического торможения двигателя. Динамическое торможение осуществляется путем отключения якорной цепи двигателя от питающей сети и подключения к ней нагрузочного сопротивления. Схема динамического торможения двигателя постоянного тока независимого возбуждения приведена на рис 7.5.

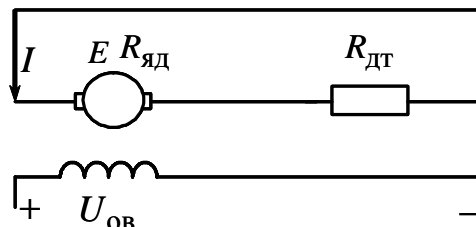


Рис. 7.5. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения в режиме динамического торможения

Уравнение электромеханической характеристики электропривода в режиме динамического торможения:

$$\omega = -I \frac{R_{\text{яц.дт}}}{c_H},$$

где  $R_{\text{яц.дт}} = R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}}$  – сопротивление якорной цепи двигателя в режиме динамического торможения;

$R_{\text{дт}}$  – сопротивление динамического торможения.

Так как динамическое торможение должно происходить при наложенных на момент и ток двигателя ограничениях ( $I \leq I_{\text{дв. max}}$ ), а торможение производится с технологической скорости  $\omega_{p1} = 90,478 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , то выражение для расчета сопротивления динамического торможения приобретает следующий вид:

$$R_{\text{дт}} = -\frac{\omega_{p1} \cdot c_H}{I_{\text{дт}}} - R_{\text{дв.гор}} = \frac{90,478 \cdot 2,079}{174,591} - 0,014 = 0,505 \text{ Ом.}$$

Как следует из расчетов, сопротивление динамического торможения  $R_{\text{дт}} = 0,505 \text{ Ом}$ .

После работы на второй рабочей ступени, необходимо затормозить электропривод. Применим торможение противовключением (характеристика б) с последующим наложением механического тормоза при достижении угловой скорости, равной нулю. Рассчитаем добавочное сопротивление в якорной цепи для организации торможения противовключением:

$$R_{\text{прот}} = \frac{U_H - \omega_{p2} \cdot c_H}{I_{\text{дв. max}}} - R_{\text{дв. гор}} = \frac{220 - (-100,531) \cdot 2,079}{363} - 0,014 = 1,168 \text{ Ом.}$$

При достижении нулевой скорости  $\omega = 0$  ток в якорной цепи составит:

$$I_{\text{кон}} = \frac{U_H}{R_{\text{прот}} + R_{\text{дв. гор}}} = \frac{220}{1,168 + 0,014} = 186,137 \text{ А.}$$

Результаты проведенных расчетов сведем в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Первая пусковая электромеханическая характеристика, $R_{п3} = 0,592 \text{ Ом}$			
$I, \text{ А}$	0	$I_{\text{пер}} = 199$	$I_{\text{дв.мах}} = 363$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	105,802	47,8	0
Вторая пусковая электромеханическая характеристика, $R_{п4} = 0,317 \text{ Ом}$			
$I, \text{ А}$	0	$I_{\text{пер}} = 199$	$I_{\text{дв.мах}} = 363$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	105,802	74,005	47,8
Первая технологическая электромеханическая характеристика, $R_1 = 0,169 \text{ Ом}$			
$I, \text{ А}$	0	$I_{\text{с1}} = 174,591$	$I_{\text{дв.мах}} = 363$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	105,802	90,478	74,005
Динамическое торможение, характеристика, $R_{\text{дт}} = 0,505 \text{ Ом}$			
$I, \text{ А}$	0	$I_{\text{с2}} = 126,234$	$-I_{\text{дв.мах}} = -363$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	0	-100,531	90,478
Вторая технологическая электромеханическая характеристика, $R_2 = 3,385 \text{ Ом}$			
$I, \text{ А}$	0	$I_{\text{с2}} = 126,234$	-
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	105,802	-100,531	-
Торможение противовключением, характеристика, $R_{\text{прот}} = 1,168 \text{ Ом}$			
$I, \text{ А}$	0	$I_{\text{кон}} = 186,137$	$I_{\text{дв.мах}} = 363$
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	105,802	0	-100,531

По данным таблицы 7.2 построим электромеханические характеристики электропривода за полный рабочий цикл, приведенные на рис. 7.6.

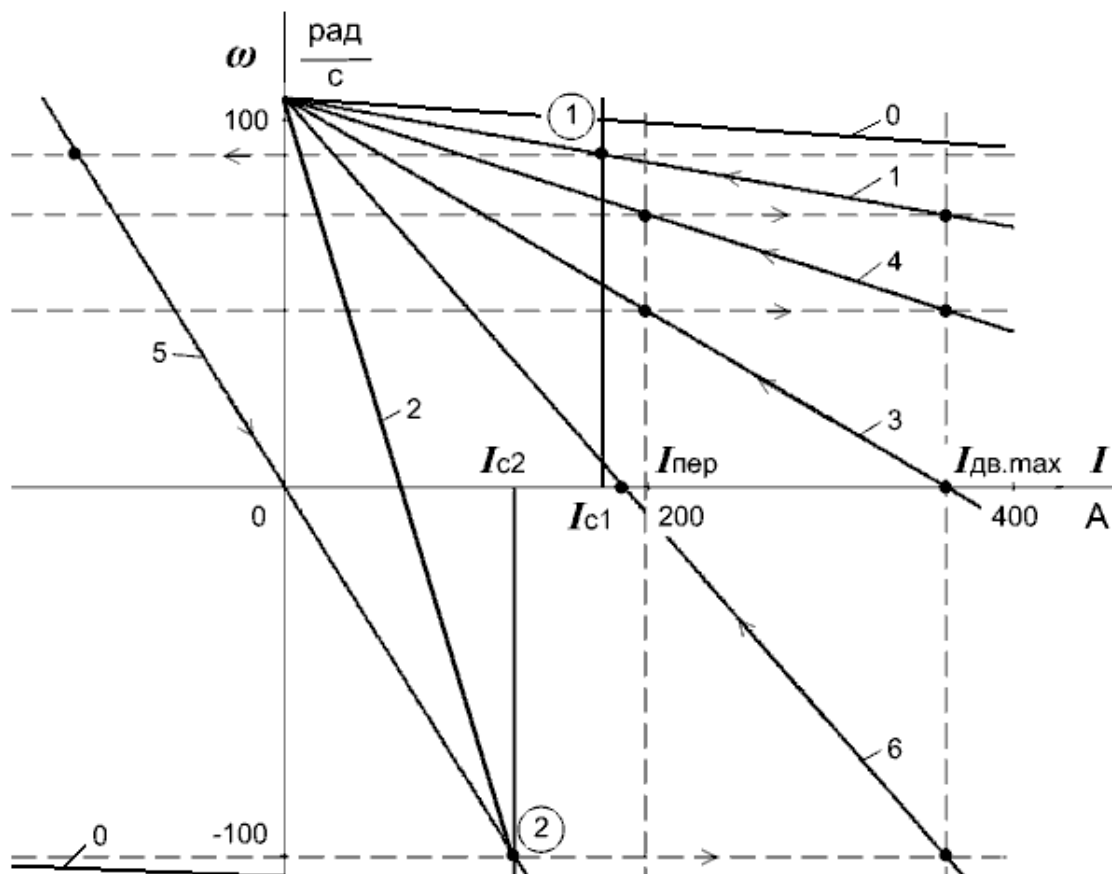


Рис. 7.6. Электромеханические характеристики электропривода за полный рабочий цикл:

- 0 – естественная электромеханическая характеристика;
- 1 – первая технологическая электромеханическая характеристика;
- 2 – вторая технологическая электромеханическая характеристика;
- 3 – первая пусковая характеристика электропривода;
- 4 – вторая пусковая характеристика электропривода;
- 5 – электромеханическая характеристика динамического торможения для перехода во вторую рабочую точку;
- 6 – электромеханическая характеристика торможения противовключением.

Схема силовой цепи для пуска двигателя постоянного тока приведена на рис. 7.7.

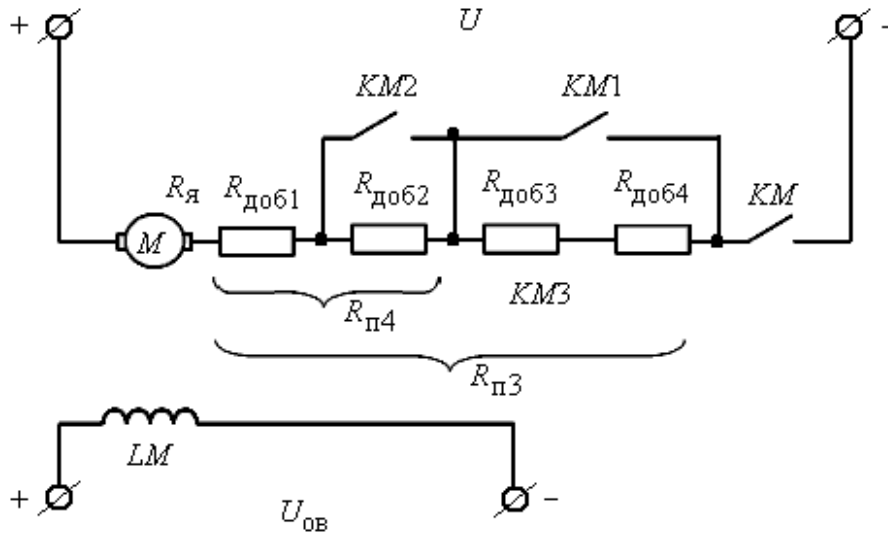


Рис. 7.7. Схема силовой цепи для пуска электропривода постоянного тока

Определим сопротивления резисторов  $R_{доб1}$ ,  $R_{доб2}$ ,  $R_{доб3}$ ,  $R_{доб4}$ ,  $R_{доб5}$  и  $R_{доб6}$  непосредственно включаемых в якорную цепь двигателя. Очевидно, они будут отличаться от сопротивлений якорной цепи двигателя  $R_{П3}$ ,  $R_{П4}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_{прот}$ , используемых для расчета электромеханических характеристик электропривода, т. к. физические резисторы, используемые для построения схемы электропривода, набираются из отдельных резисторов.

Так, для работы на второй электромеханической характеристике 2, рис. 7.6 с технологической скоростью  $\omega_{р2}$  в цепь якоря двигателя должно быть введено максимальное сопротивление  $R_2 = 3,385$  Ом, полученное путем сложения сопротивлений всех резисторов, включенных последовательно в якорную цепь двигателя:

$$R_2 = R_{доб1} + R_{доб2} + R_{доб3} + R_{доб4} + R_{доб5} + R_{доб6} = 3,385 \text{ Ом.}$$

При пуске, на первых двух пусковых характеристиках, а затем на первой рабочей характеристике необходимо иметь в якорной цепи следующие сопротивления:

$$R_{П3} = R_{доб1} + R_{доб2} + R_{доб3} + R_{доб4} = 0,592 \text{ Ом;}$$

$$R_{П4} = R_{доб1} + R_{доб2} = 0,317 \text{ Ом;}$$

$$R_1 = R_{доб1} = 0,169 \text{ Ом.}$$

Из приведенных соотношений можно определить:

$$R_{доб2} = R_{П4} - R_{доб1} = 0,317 - 0,169 = 0,148 \text{ Ом;}$$

$$R_{доб3} + R_{доб4} = R_{П3} - R_{П4} = 0,592 - 0,317 = 0,275 \text{ Ом.}$$

Для режима динамического торможения (характеристика 5, рис. 7.6) нам требуется сопротивление  $R_{\text{дт}} = 0,505$  Ом. Очевидно, что оно может быть получено путем добавления  $R_{\text{доб3}}$  к цепочке резисторов  $R_{\text{п4}}$ :

$$R_{\text{доб3}} = R_{\text{дт}} - R_{\text{п4}} = 0,505 - 0,317 = 0,188 \text{ Ом.}$$

Теперь можно определить величину сопротивления  $R_{\text{доб4}}$ :

$$R_{\text{доб4}} = R_{\text{п3}} - R_{\text{п4}} - R_{\text{доб3}} = 0,275 - 0,188 = 0,087 \text{ Ом.}$$

Аналогично определяем величины сопротивлений  $R_{\text{доб5}}$  и  $R_{\text{доб6}}$ :

$$R_{\text{доб5}} = R_{\text{прот}} - R_{\text{п1}} = 1,168 - 0,592 = 0,576 \text{ Ом;}$$

$$R_{\text{доб6}} = R_2 - R_{\text{прот}} = 3,385 - 1,168 = 2,217 \text{ Ом.}$$

Таким образом, все сопротивления резисторов якорной цепи для организации полного рабочего цикла электропривода найдены.

Принципиальная схема силовых цепей электропривода для полного цикла работы приведена на рис. 7.8. Рассмотрим по ней каждый режим работы электропривода.

При пуске двигателя по первой пусковой характеристике 3, рис. 7.6 замкнуты контакты пускателей  $KM$ ,  $KM3$  и  $KM4$ , а остальные контакты разомкнуты. Далее, при переходе на вторую пусковую характеристику 4, рис. 7.6 дополнительно замыкается контакт  $KM1$ , исключаящий из цепи реостаты  $R_{\text{доб3}}$  и  $R_{\text{доб4}}$ . При дальнейшем разгоне дополнительно к уже замкнутым контактам  $KM$ ,  $KM3$ ,  $KM4$ ,  $KM1$  замыкаются контакты пускателя  $KM2$  и двигатель переходит на разгон по первой рабочей характеристике 1, рис. 7.6 до скорости  $\omega_{p1}$  и работает на ней отведенное время – 65 с.

После работы на первой рабочей ступени, необходимо по характеристике динамического торможения 5, рис. 7.6 перейти на вторую рабочую ступень. Это осуществляется путем размыкания контактов пускателя  $KM1$  и замыканием контактов пускателя  $KM5$ . По завершении переходного процесса, схема переключается для работы на второй рабочей ступени.



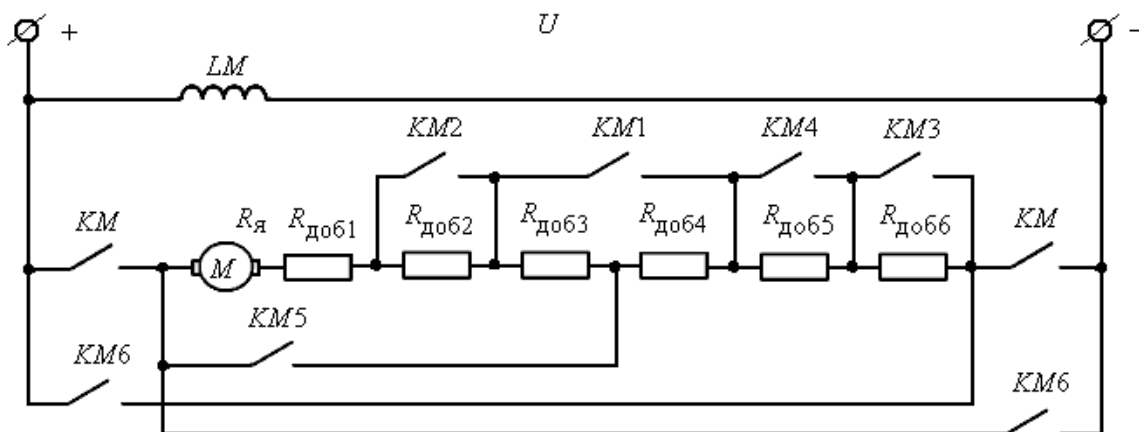


Рис. 7.8. Схема силовых цепей электропривода для полного цикла работы

При работе на второй технологической характеристике 2, рис. 7.6 со скоростью  $\omega_{p2}$  в силовой якорной цепи (см. рис. 7.8) замкнут контакт пускателя  $KM$ , а контакты  $KM1$ ,  $KM2$ ,  $KM3$ ,  $KM4$ ,  $KM5$  разомкнуты. После работы на второй технологической ступени в течение 90 с. электродвигатель необходимо затормозить.

В режиме торможения противовключением срабатывает контактор  $KM6$  и своими контактами изменяет полярность питающего напряжения якорной цепи. Наряду с контактами  $KM6$ , должен быть замкнут контакт  $KM4$ , а остальные контакты должны быть разомкнуты. Особое внимание следует обратить на отключение контактов  $KM$ , так как при их одновременном включении с контактами  $KM6$  произойдет короткое замыкание.

## 7.5. Расчет переходных процессов

Переходным, или динамическим, режимом электропривода называется режим работы при переходе из одного установившегося состояния привода к другому, происходящему во время пуска, торможения, реверсирования и резкого приложения нагрузки на валу. Эти режимы характеризуются изменениями ЭДС, угловой скорости, момента и тока. Переходные процессы тока и скорости электропривода постоянного тока независимого возбуждения при линейных статических характеристиках двигателя и производственного механизма можно рассчитать по формулам [2]:

$$I = I_{уст} + (I_{нач} - I_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}};$$

$$w = w_{уст} + (w_{нач} - w_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}},$$

где  $I_{нач}$  – начальное значение тока двигателя, А;

$I_{уст}$  – установившееся значение тока двигателя при моменте нагрузки  $M_c = M_{уст}$ , А;

$w_{уст}$  – установившаяся угловая скорость двигателя при моменте нагрузки  $M_c = M_{уст}$ ,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$\omega_{нач}$  – начальное значение угловой скорости,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$T_M$  – электромеханическая постоянная времени электропривода, с.

Расчет электромеханических постоянных времени  $T_{Mi}$  для каждой из реостатных характеристик осуществляется в соответствии с выражением:

$$T_{Mi} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{яцi}}{c_H^2},$$

где  $R_{яцi}$  – суммарное сопротивление якорной цепи на соответствующей характеристике, Ом;

$c_H$  – коэффициент ЭДС,  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;

$J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{д} + J_{м} \cdot \frac{1}{i_{ст.р}^2},$$

где  $k = (1,05 \div 1,3)$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

$J_{дв}$  – момент инерции двигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_{дв} = 1,05$ ;

$J_{м}$  – момент инерции производственного механизма,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_{м} = 32$ ;

$i_{ст.р}$  – стандартное передаточное отношение редуктора;  $i_{ст.р} = 8$ .

Учитывая, что моменты инерции двигателя  $J_{дв}$  и производственного механизма  $J_{м}$  за цикл работы электропривода не изменяются,

найдем суммарный момент электропривода, приняв значение коэффициента  $k = 1,1$ . Тогда

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{\text{д}} + J_{\text{м}} \cdot \frac{1}{i_{\text{ст.р}}^2} = 1,1 \cdot 1,05 + 32 \cdot \frac{1}{8^2} = 1,655 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Время  $t_{\text{пп}i}$  работы двигателя на  $i$ -ой характеристике, при изменении момента в пределах от  $M_{\text{нач}}$  до  $M_{\text{кон}}$ , определяется по формуле:

$$t_{\text{пп}i} = T_{\text{ми}} \cdot \ln \frac{M_{\text{нач}} - M_{\text{уст}}}{M_{\text{кон}} - M_{\text{уст}}},$$

где  $M_{\text{нач}}$  и  $M_{\text{кон}}$  – значения моментов в начале и конце рассматриваемого переходного процесса;

$M_{\text{уст}}$  – установившийся момент двигателя.

Учитывая, что электромагнитный момент двигателя постоянного тока пропорционален току обмотки якоря, уравнение для расчета времени переходного процесса работы двигателя на произвольной характеристике можно преобразовать к виду:

$$t_{\text{пп}i} = T_{\text{ми}} \cdot \ln \frac{I_{\text{нач}} - I_{\text{уст}}}{I_{\text{кон}} - I_{\text{уст}}},$$

где  $I_{\text{нач}}$  и  $I_{\text{кон}}$  – значения токов двигателя, взятые из графика электромеханической характеристики в начале и конце рассматриваемого переходного процесса;

$I_{\text{уст}}$  – установившийся ток якоря двигателя.

• *Первая пусковая характеристика* (характеристика 3 на рис. 7.6, 7.13).

Сопротивление якорной цепи:

$$\begin{aligned} R_{\text{яц}3} &= R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{доб1}} + R_{\text{доб2}} + R_{\text{доб3}} = \\ &= 0,014 + 0,275 + 0,148 + 0,169 = 0,606 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{\text{м}3} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{яц}3}}{c_{\text{н}}^2} = \frac{1,655 \cdot 0,606}{2,079^2} = 0,232 \text{ с.}$$

Время переходного процесса пуска двигателя на первой пусковой характеристике:

$$t_{\text{ппз}} = T_{\text{мз}} \cdot \ln \frac{I_{\text{начз}} - I_{\text{устз}}}{I_{\text{конз}} - I_{\text{устз}}},$$

где  $I_{\text{начз}}$  – максимально допустимый ток якоря двигателя,

$$I_{\text{дв.мах}} = 363 \text{ А};$$

$$I_{\text{конз}} - \text{ток переключения}; I_{\text{пер}} = 199 \text{ А};$$

$I_{\text{устз}}$  – установившееся значение тока двигателя,

$$I_{\text{устз}} = I_{\text{с1}} = 174,591 \text{ А}.$$

$$t_{\text{ппз}} = 0,232 \cdot \ln \frac{363 - 174,591}{199 - 174,591} = 0,484 \text{ с}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса тока якоря:

$$I = I_{\text{устз}} + (I_{\text{начз}} - I_{\text{устз}}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{\text{мз}}}},$$

где  $I_{\text{начз}}$  – начальное значение тока якоря, равное допустимому току двигателя,  $I_{\text{начз}} = I_{\text{дв.мах}} = 363 \text{ А};$

$I_{\text{устз}}$  – установившееся значение тока двигателя,

$$I_{\text{устз}} = I_{\text{с1}} = 174,591 \text{ А}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$I = 174,591 + (363 - 174,591) \cdot e^{\frac{-t}{0,232}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса скорости пуска по первой пусковой характеристике 3, рис. 7.6:

$$\omega = \omega_{\text{устз}} + (\omega_{\text{начз}} - \omega_{\text{устз}}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{\text{мз}}}},$$

где  $\omega_{\text{начз}}$  – начальное значение угловой скорости;  $\omega_{\text{начз}} = 0, \frac{\text{рад}}{\text{с}};$

$\omega_{\text{устз}}$  – установившаяся угловая скорость двигателя, определяется по первой пусковой характеристике при статическом токе двигателя,

$$\omega_{\text{устз}} = \frac{U_{\text{н}}}{c_{\text{н}}} - I_{\text{с1}} \frac{R_{\text{яцз}}}{c_{\text{н}}} = \frac{220}{2,079} - 174,591 \frac{0,606}{2,079} = 54,915 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$w = 54,915 + (0 - 54,915) \cdot e^{\frac{-t}{0,232}}.$$

Расчет переходных процессов произведем в программной среде MathCAD, а численные значения параметров снимем с помощью трассировщика.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  пуска двигателя по первой пусковой характеристике 3 приведены на рис. 7.9.

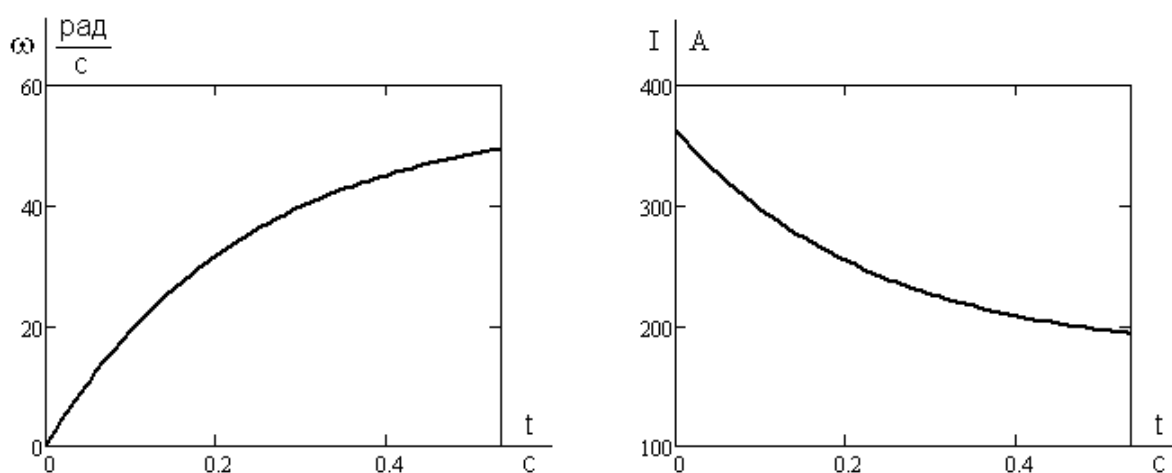


Рис. 7.9. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  пуска двигателя по первой пусковой характеристике

Расчетные значения тока и скорости в переходных процессах на первой пусковой характеристике 3, рис. 7.6 сведем в табл. 7.3.

Таблица 7.3

$t, c$	0	0,069	0,138	0,207	0,277	0,346	0,415	0,484
$I, A$	363	313,91	277,58	250,62	230,87	216,17	205,37	198,97
$\omega, \frac{\text{рад}}{c}$	0	14,304	24,862	32,695	38,459	42,762	45,927	47,821

• *Вторая пусковая характеристика* (характеристика 4 на рис. 7.13).

Сопротивление якорной цепи:

$$\begin{aligned} R_{\text{яц}4} &= R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{доб}2} + R_{\text{доб}3} = \\ &= 0,014 + 0,148 + 0,169 = 0,331 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{M4} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{яц4}}{c_H^2} = \frac{1,655 \cdot 0,331}{2,079^2} = 0,127 \text{ с.}$$

Время переходного процесса пуска двигателя на второй пусковой характеристике:

$$t_{пп4} = T_{M4} \cdot \ln \frac{I_{нач4} - I_{уст4}}{I_{кон4} - I_{уст4}},$$

где  $I_{нач4}$  – максимально допустимый ток якоря двигателя,

$$I_{дв.мах} = 363 \text{ А};$$

$$I_{кон4} \text{ – ток переключения, } I_{пер} = 199 \text{ А};$$

$$I_{уст4} \text{ – установившееся значение тока двигателя,}$$

$$I_{уст4} = I_{c1} = 174,591 \text{ А.}$$

$$t_{пп4} = 0,127 \cdot \ln \frac{363 - 174,591}{199 - 174,591} = 0,26 \text{ с.}$$

Уравнение для расчета переходного процесса тока якоря:

$$I = I_{уст4} + (I_{нач4} - I_{уст4}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M4}}},$$

где  $I_{нач4}$  – максимально допустимый ток якоря двигателя,

$$I_{дв.мах} = 363 \text{ А};$$

$$I_{уст4} \text{ – установившееся значение тока двигателя,}$$

$$I_{уст4} = I_{c1} = 174,591 \text{ А.}$$

После подстановки численных значений параметров:

$$I = 174,591 + (363 - 174,591) \cdot e^{\frac{-t}{0,127}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса скорости при пуске по второй пусковой характеристике 4, рис. 7.13:

$$\omega = \omega_{уст4} + (\omega_{нач4} - \omega_{уст4}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M4}}},$$

где  $\omega_{нач4}$  – начальное значение угловой скорости,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$\omega_{уст4}$  – установившаяся угловая скорость двигателя,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Начальное значение угловой скорости  $\omega_{\text{нач4}}$  второй пусковой характеристики найдем при максимально допустимом токе двигателя  $I_{\text{дв.мах}} = 363$  А из выражения:

$$\omega_{\text{нач4}} = \frac{U_{\text{н}}}{c_{\text{н}}} - I_{\text{дв.мах}} \frac{R_{\text{яц4}}}{c_{\text{н}}} = \frac{220}{2,079} - 363 \frac{0,331}{2,079} = 47,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Установившуюся угловую скорость двигателя  $\omega_{\text{уст4}}$  определим по второй пусковой характеристике 4, рис. 7.13 при статическом токе двигателя  $I_{\text{уст4}} = I_{\text{с1}} = 174,591$  А:

$$\omega_{\text{уст4}} = \frac{U_{\text{н}}}{c_{\text{н}}} - I_{\text{с}} \frac{R_{\text{яц4}}}{c_{\text{н}}} = \frac{220}{2,079} - 174,591 \frac{0,331}{2,079} = 78,045 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$\omega = 78,045 + (47,8 - 78,045) \cdot e^{\frac{-t}{0,127}}.$$

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  пуска двигателя по второй пусковой характеристике 4 приведены на рис. 7.10.

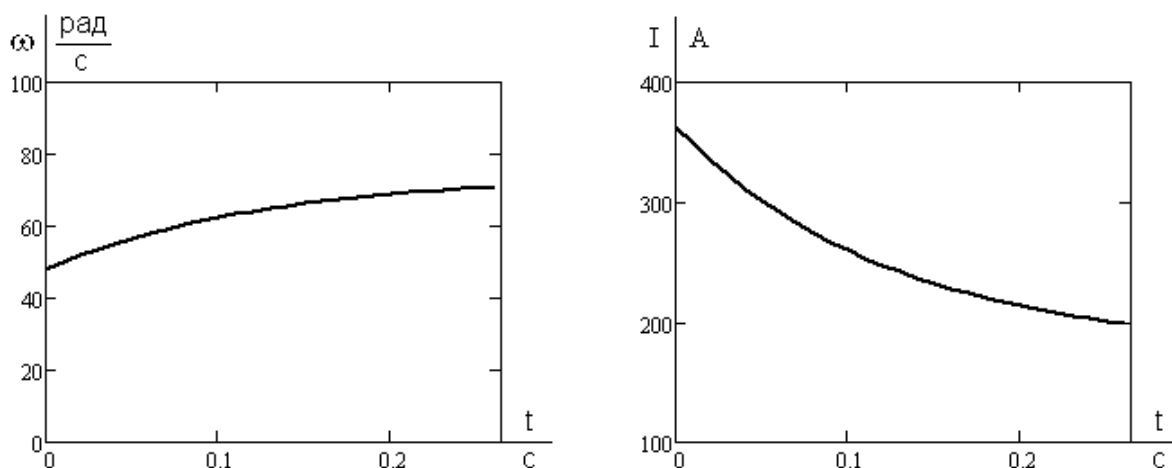


Рис. 7.10. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  пуска двигателя по второй пусковой характеристике

Расчетные значения тока и скорости в переходных процессах по второй пусковой характеристике 4, рис. 7.13 сведем в табл. 7.4.

Таблица 7.4

$t, c$	0	0,038	0,075	0,113	0,151	0,189	0,226	0,26
$I, A$	363	312,16	283,25	247,93	232,32	216,68	205,43	199
$\omega, \frac{\text{рад}}{c}$	47,8	54,87	58,89	62,97	65,95	68,12	69,71	73,93

• *Первая технологическая характеристика* (характеристика  $I$  на рис. 7.13)

Сопротивление якорной цепи:

$$R_{\text{яц1}} = R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{доб3}} = 0,014 + 0,169 = 0,183 \text{ Ом.}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{\text{м1}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{яц1}}}{c_{\text{H}}^2} = \frac{1,655 \cdot 0,183}{2,079^2} = 0,07 \text{ с.}$$

Время переходного процесса пуска двигателя на первую технологическую характеристику:

$$t_{\text{пп1}} = 3 \cdot T_{\text{м1}} = 3 \cdot 0,07 = 0,21 \text{ с.}$$

Уравнение для расчета переходного процесса тока якоря:

$$I = I_{\text{уст1}} + (I_{\text{нач1}} - I_{\text{уст1}}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{\text{м1}}}},$$

где  $I_{\text{нач1}}$  – начальное значение тока якоря, равное допустимому току двигателя,  $I_{\text{нач1}} = I_{\text{дв.мах}} = 363 \text{ А}$ ;

$I_{\text{уст1}}$  – установившееся значение тока двигателя,

$$I_{\text{уст1}} = I_{\text{с1}} = 174,591 \text{ А.}$$

После подстановки численных значений параметров:

$$I = 174,591 + (363 - 174,591) \cdot e^{\frac{-t}{0,07}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса скорости пуска по первой технологической характеристике:

$$\omega = \omega_{\text{уст1}} + (\omega_{\text{нач1}} - \omega_{\text{уст1}}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{\text{м1}}}},$$

где  $\omega_{\text{уст1}}$  – установившаяся угловая скорость двигателя,

$$\omega_{\text{уст1}} = \omega_{\text{р1}} = 90,478, \frac{\text{рад}}{c};$$



$\omega_{\text{нач1}}$  – начальное значение угловой скорости  $\omega_{\text{нач1}}$  первой технологической характеристики найдем при максимально допустимом токе двигателя  $I_{\text{дв. max}} = 363$  А из выражения:

$$\omega_{\text{нач1}} = \frac{U_{\text{H}}}{c_{\text{H}}} - I_{\text{дв. max}} \frac{R_{\text{яц}}}{c_{\text{H}}} = \frac{220}{2,079} - 363 \frac{0,183}{2,079} = 74,005 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$\omega = 90,478 + (74,005 - 90,478) \cdot e^{\frac{-t}{0,07}}.$$

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  для первой технологической характеристики, рассчитанные в программе MathCAD, приведены на рис. 7.11.

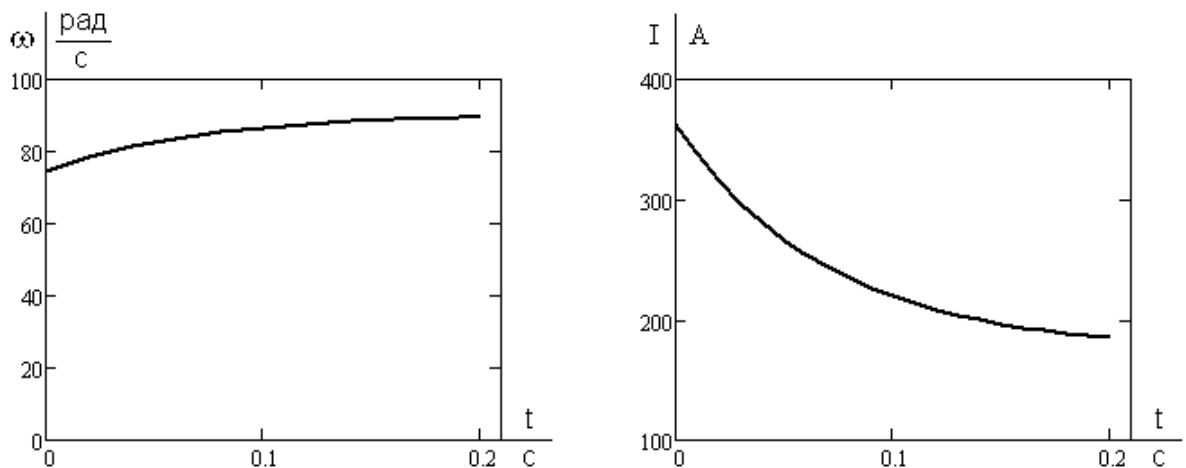


Рис. 7.11. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  разгона двигателя по первой технологической характеристике

Расчетные значения тока и скорости в переходных режимах характеристики 1, рис. 7.13 сведем в табл. 7.5.

Таблица 7.5

$t, \text{с}$	0	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21
$I, \text{А}$	363	297,22	254,41	226,54	208,41	196,6	188,92	174,632
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	74,005	79,76	83,5	85,94	87,52	88,55	89,23	90,47

Время работы на первой технологической характеристике  $t_{\text{p1}} = 65$  с.

- *Характеристика динамического торможения* при переходе на вторую технологическую характеристику (характеристика 5 на рис. 7.13)

Вычислим сопротивление якорной цепи для режима динамического торможения двигателя:

$$R_{\text{яц.дт}} = R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{дт}} = 0,014 + 0,505 = 0,519 \text{ Ом.}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{\text{м5}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{\text{яц.дт}}}{c_{\text{н}}^2} = \frac{1,655 \cdot 0,519}{2,079^2} = 0,198 \text{ с.}$$

Необходимо обратить внимание, что для расчета времени переходного процесса динамического торможения двигателя при переходе на вторую технологическую характеристику, требуется разбить характеристику 5 рис. 7.6 на два участка – первый участок 5\_1 для  $\omega \geq 0$  и второй участок 5\_2 для  $\omega \leq 0$ , рис. 7.13.

Вычислим время переходного процесса на участке 5\_1 электромеханической характеристики 5, рис. 7.13:

$$t_{\text{пп5}_1} = T_{\text{м5}} \cdot \ln \frac{I_{\text{нач5}_1} - I_{\text{уст5}_1}}{I_{\text{кон5}_1} - I_{\text{уст5}_1}},$$

где  $I_{\text{нач5}_1}$  – начальное значение тока якоря, равное допустимому току двигателя,  $I_{\text{нач1}} = -I_{\text{дв.мах}} = -363 \text{ А}$ ;

$I_{\text{кон5}_1} = 0$  – конечное значение тока якоря;

$I_{\text{уст5}_1}$  – установившееся значение тока якоря двигателя,

$I_{\text{уст5}_1} = I_{\text{с1}} = 174,591 \text{ А}$ .

$$t_{\text{пп5}_1} = 0,198 \cdot \ln \frac{363 - 174,591}{0 - 174,591} = 0,223 \text{ с.}$$

Уравнение для расчета переходного процесса тока якоря на участке 5\_1 электромеханической характеристики 5, рис. 7.13:

$$I = I_{\text{уст5}_1} + (I_{\text{нач5}_1} - I_{\text{уст5}_1}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{\text{м5}}}},$$

где  $I_{\text{нач5}_1}$  – начальное значение тока якоря, равное допустимому току двигателя,  $I_{\text{нач5}_1} = -I_{\text{дв.мах}} = -363 \text{ А}$ ;

$I_{\text{уст5}_1}$  – установившееся значение тока якоря двигателя,

$I_{\text{уст5}_1} = I_{\text{с1}} = 174,591 \text{ А}$ .

После подстановки численных значений параметров:

$$I = 174,591 + (-363 - 174,591) \cdot e^{\frac{-t}{0,198}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса скорости электродвигателя на участке 5\_1 электрохимической характеристики 5, рис. 7.13:

$$w = w_{уст5\_1} + (w_{нач5\_1} - w_{уст5\_1}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M5}}},$$

где  $\omega_{нач5\_1}$  – начальное значение угловой скорости,

$$\omega_{нач5\_1} = \omega_{p1} = 90,478 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$\omega_{уст5\_1}$  – установившаяся угловая скорость двигателя,

$$w_{уст5\_1} = -I_{c1} \frac{R_{яц,дт}}{c_H} = -174,591 \frac{1,656}{2,079} = -43,517 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$w = -43,517 + (90,478 - (-43,517)) \cdot e^{\frac{-t}{0,198}}.$$

Расчет переходных процессов произведем в программной среде MathCAD, а численные значения параметров снимем с помощью трассировщика.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  для участка 5\_1, рис. 7.13 приведены на рис. 7.12.

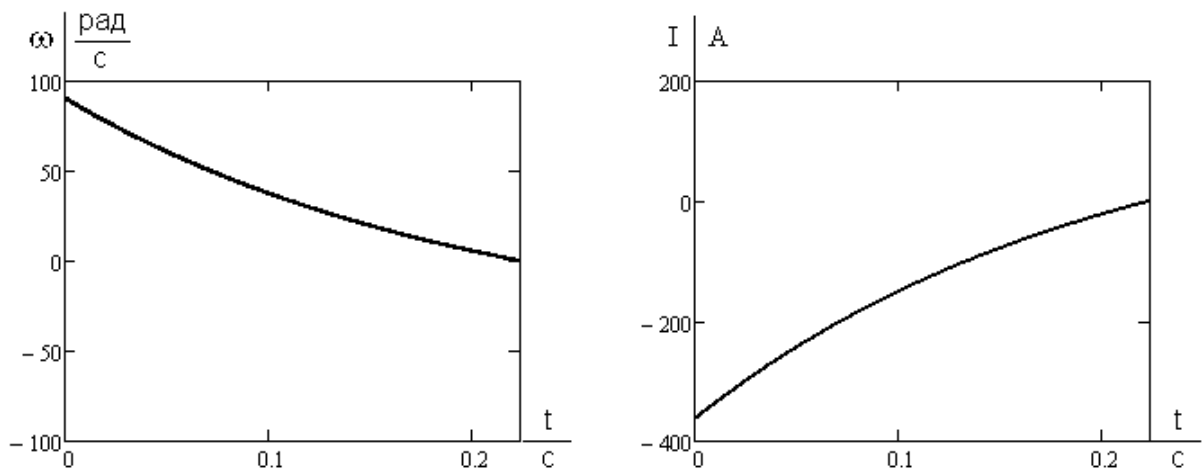


Рис. 7.12. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  участка 5\_1 характеристики 5 режима динамического торможения двигателя при переходе на вторую технологическую характеристику 2

Расчетные значения тока и скорости режима динамического торможения двигателя для первого участка характеристики 5 сведем в табл. 7.6.

Таблица 7.6

$t, c$	0	0,032	0,064	0,096	0,127	0,159	0,191	0,223
$I, A$	-363	-281,59	-214,7	-156,87	-108,9	-66,783	-30,69	0
$\omega, \frac{рад}{с}$	90,478	70,32	53,41	38,91	27,22	16,78	7,65	0

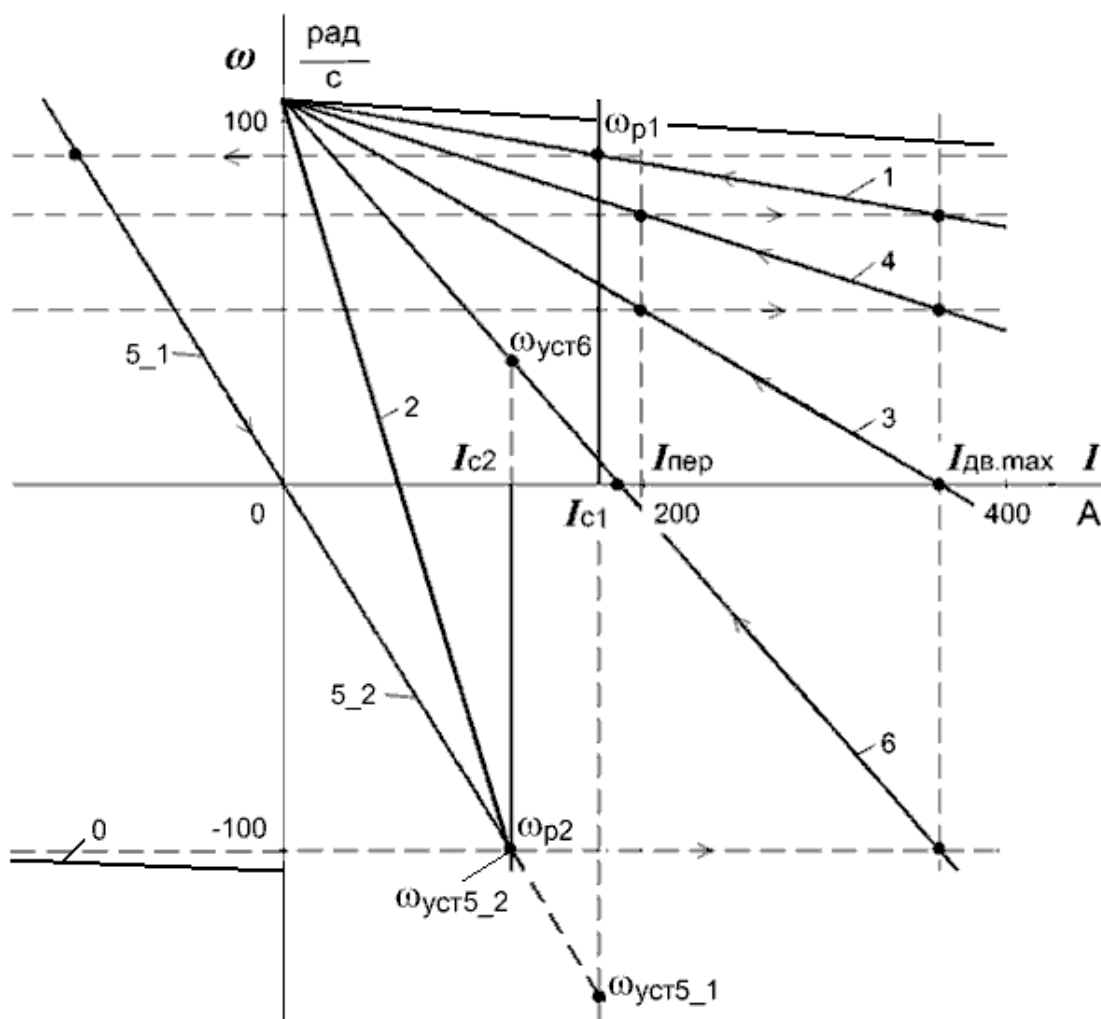


Рис. 7.13. Электромеханические характеристики электропривода за полный рабочий цикл с обозначением некоторых установившихся скоростей вращения якоря: 0 – естественная электромеханическая характеристика; 1 – первая технологическая электромеханическая характеристика; 2 – вторая технологическая электромеханическая характеристика; 3 – первая пусковая характеристика электропривода; 4 – вторая пусковая характеристика электропривода; 5\_1 – первый участок электромеханической характеристики 5 динамического торможения; 5\_2 – второй участок электромеханической характеристики 5 динамического торможения для перехода во вторую рабочую точку; 6 – электромеханическая характеристика торможения противовключением.

Далее вычислим время переходного процесса на участке 5\_2 электромеханической характеристики 5, рис. 7.13:

$$t_{пп5\_2} = 3 \cdot T_{M5} = 3 \cdot 0,198 = 0,595 \text{ с.}$$

Найдем суммарное время переходного процесса перехода двигателя с первой рабочей точки на вторую рабочую точку по характеристике 5:

$$t_{пп5} = t_{пп5\_1} + t_{пп5\_2} = 0,223 + 0,595 = 0,818 \text{ с.}$$

Уравнение для расчета переходного процесса тока якоря на участке 5\_2 электромеханической характеристики 5, рис. 7.13:

$$I = I_{уст5\_2} + (I_{нач5\_2} - I_{уст5\_2}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M5}}},$$

где  $I_{нач5\_2} = 0$  – начальное значение тока якоря двигателя;

$I_{уст5\_2}$  – установившееся значение тока двигателя,

$$I_{уст5\_2} = I_{c2} = 126,234 \text{ А.}$$

После подстановки численных значений параметров:

$$I = 126,234 + (0 - 126,234) \cdot e^{\frac{-t}{0,198}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса скорости электродвигателя на участке 5\_2 электромеханической характеристики 5:

$$\omega = \omega_{уст5\_2} + (\omega_{нач5\_2} - \omega_{уст5\_2}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M5}}},$$

где  $\omega_{нач5\_2} = 0$  – начальное значение угловой скорости двигателя;

$\omega_{уст5\_2}$  – установившаяся угловая скорость двигателя при токе  $I_{c2}$ ,

$$\omega_{уст5\_2} = \omega_{p2} = -100,531 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

После подстановки численных значений параметров:

$$\omega = -100,531 + (0 - (-100,531)) \cdot e^{\frac{-t}{0,198}}.$$

Расчет переходных процессов произведем в программной среде MathCAD, а численные значения параметров снимем с помощью трассировщика.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  для второго участка характеристики 5 приведены на рис. 7.14.

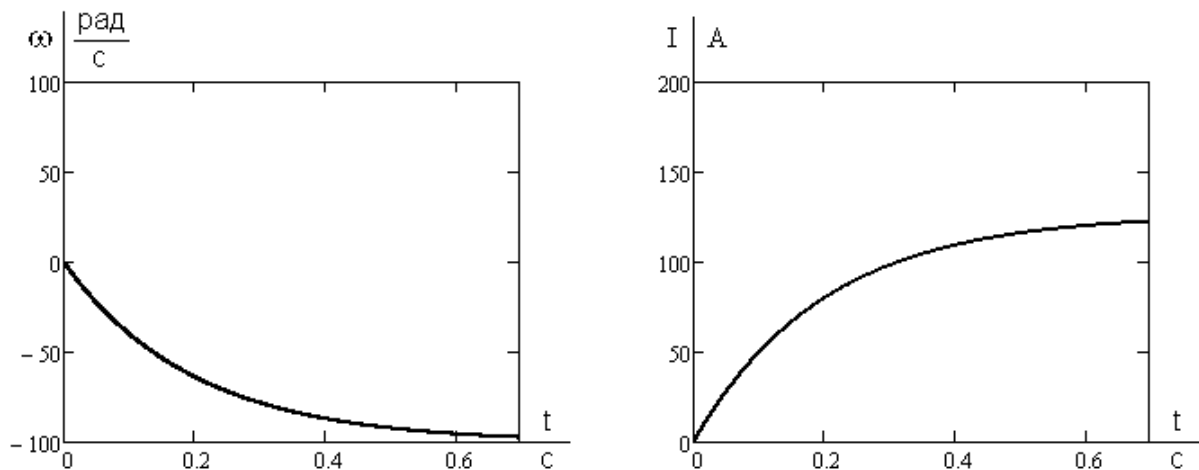


Рис. 7.14. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  участка 5\_2 характеристики 5 режима динамического торможения двигателя при переходе на вторую технологическую характеристику 2

Расчетные значения тока и скорости режима динамического торможения двигателя для второго участка характеристики 5, рис. 7.13 сведен в табл. 7.7.

Таблица 7.7

$t, c$	0	0,085	0,17	0,255	0,34	0,425	0,51	0,595
$I, A$	0	43,912	72,736	91,346	103,56	111,4	116,42	126,12
$\omega, \frac{рад}{с}$	0	-34,97	-58,37	-72,65	-82,6	-88,76	-94,88	-99,89

Время работы на второй технологической характеристике  $t_{p2} = 90$  с.

- *Характеристика торможения противовключением* (характеристика б на рис. 7.13)

Торможение начинается с угловой скорости  $\omega_{нач} = \omega_{p2}$  – угловой скорости двигателя во второй рабочей точке. Под установившейся скоростью принимается фиктивная скорость  $\omega_{устб}$ , определяемая пересечением электромеханической характеристики режима торможения противовключением и статического тока  $I_{c2}$ . При достижении скорости, равной нулю, необходимо остановить электропривод путем отключения двигателя от сети и наложением электромеханического тормоза. Начальным значением тока режима динамического торможения является

допустимый ток двигателя  $I_{дв.мах}$ . Установившимся значением тока является статический ток  $I_{с2}$ .

Сопротивление якорной цепи режима торможения противовключением:

$$R_{яц.прот} = R_{дв.гор} + R_{прот} = 0,014 + 1,168 = 1,182 \text{ Ом.}$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_{мб} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_{яц.прот}}{c_H^2} = \frac{1,655 \cdot 1,182}{2,079^2} = 0,452 \text{ с.}$$

Уравнение для расчета переходного процесса торможения противовключением (характеристика б, рис. 7.13) для тока якоря:

$$I = I_{устб} + (I_{начб} - I_{устб}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{мб}}},$$

где  $I_{начб}$  – начальное значение тока якоря, равное допустимому току двигателя;  $I_{начб} = I_{дв.мах} = 363 \text{ А}$ ;

$I_{устб}$  – установившееся значение тока двигателя,

$I_{устб} = I_{с2} = 126,234 \text{ А}$ .

После подстановки численных значений параметров

$$I = 126,234 + (363 - 126,234) \cdot e^{\frac{-t}{0,452}}.$$

При достижении нулевой скорости  $\omega = 0$  ток в якорной цепи составит:

$$I_{конб} = \frac{U_H}{R_{яц.прот}} = \frac{220}{1,182} = 186,137 \text{ А.}$$

Время торможения до полной остановки, когда  $\omega = 0$ , может быть определено из уравнения:

$$t_{ппб} = T_{мб} \cdot \ln \frac{I_{начб} - I_{устб}}{I_{конб} - I_{устб}},$$

где  $I_{начб}$  – максимально допустимый ток якоря двигателя;

$I_{дв.мах} = 363 \text{ А}$ ;

$I_{конб}$  – ток в якорной цепи при  $\omega = 0$ ;  $I_{конб} = 186,137 \text{ А}$ ;

$I_{устб}$  – установившийся ток якоря двигателя;  $I_{устб} = I_{с2} = 126,234 \text{ А}$ .

$$t_{ппб} = 0,452 \cdot \ln \frac{363 - 126,234}{186,137 - 126,234} = 0,622 \text{ с.}$$

Уравнение для расчета переходного процесса скорости режима торможения противовключением (характеристика б, рис. 7.13):

$$\omega = \omega_{устб} + (\omega_{начб} - \omega_{устб}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{мб}}},$$

где  $\omega_{начб}$  – начальное значение угловой скорости,

$$\omega_{начб} = \omega_{р2} = -100,531, \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$\omega_{устб}$  – установившаяся угловая скорость двигателя; определяется по характеристике торможения противовключением при статическом токе двигателя  $I_{с2}$ :

$$\omega_{устб} = \frac{U_{н}}{c_{н}} - I_{с2} \frac{R_{яц \text{ прот}}}{c_{н}} = \frac{220}{2,079} - 126,234 \frac{1,182}{2,079} = 34,05 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$\omega = 34,05 + [-100,531 - 34,05] \cdot e^{\frac{-t}{0,452}}.$$

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  торможения двигателя противовключением характеристики б приведены на рис. 7.15.

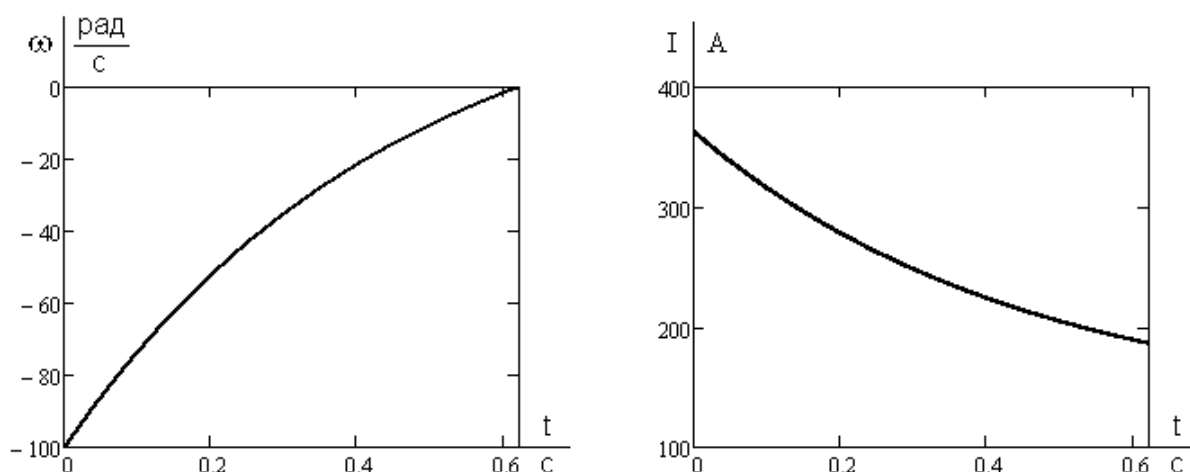


Рис. 7.15. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  режима торможения двигателя противовключением (характеристика б)

Расчетные значения тока и скорости в процессе торможения двигателя противовключением (характеристика б, рис. 7.13) сведем в табл. 7.8.



Таблица 7.8

$t, \text{с}$	0	0,089	0,179	0,268	0,358	0,447	0,537	0,626
$I, \text{А}$	363	321,02	285,61	256,99	233,37	214,25	198,55	186,01
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	-100,53	-76,52	-56,42	-40,17	-27,01	-15,84	-6,88	0

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  и тока  $I = f(t)$  для полного цикла работы электропривода приведены на рисунках 7.16 и 7.17 соответственно.

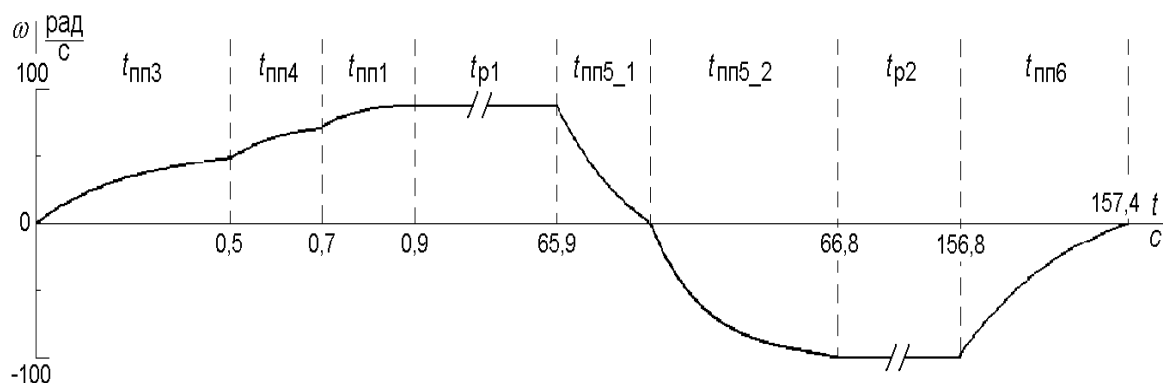


Рис. 7.16. График переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$  для полного цикла работы электропривода.

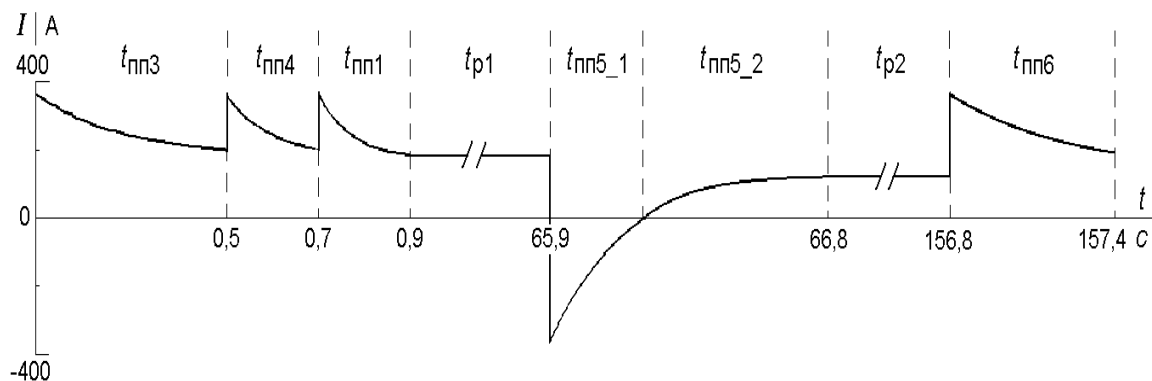


Рис. 7.17. График переходных процессов тока  $I = f(t)$  для полного цикла работы электропривода.

На графиках приведены следующие участки:  $t_{пн3}$  – разгон по первой пусковой характеристике 3, рис. 7.13;  $t_{пн4}$  – разгон по второй пусковой характеристике 4;  $t_{пн1}$  – разгон по первой технологической ха-

рабочей характеристике 1;  $t_{p1}$  – работа на первой технологической характеристике 1;  $t_{пп5\_1}$ ,  $t_{пп5\_2}$  – динамическое торможение (характеристика 5) для перехода на вторую технологическую характеристику 2;  $t_{p2}$  – работа на второй технологической характеристике 2;  $t_{пп6}$  – торможение противовключением (характеристика 6).

Как следует из анализа графиков, представленных на рисунках 7.16 и 7.17, время включенного состояния электропривода, с учетом переходных режимов, увеличилось и составляет  $t_p = 157,4$  с.

## 7.6. Проверка двигателя по нагреву и перегрузке

Потери энергии в двигателе вызывают нагрев его отдельных частей. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Чем больше нагревостойкость, тем при той же мощности меньше размеры двигателя или при тех же размерах можно увеличить его мощность.

Проверка двигателя постоянного тока по нагреву производится на основе рассчитанных графиков переходных процессов тока для полного цикла работы электропривода и его режима работы.

Обычно применяются методы эквивалентного (среднеквадратичного) тока.

В общем виде эквивалентный ток двигателя за рабочий цикл можно вычислить по следующему уравнению:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\int_0^{\sum t_p + \sum t_{\text{пп}}} I^2(t) \cdot dt}{\sum t_i \cdot \beta_i}}, \quad (4.92)$$

- где  $I_{\text{э}}$  – искомое значение эквивалентной величины тока, А;  
 $\sum t_p$  – суммарное время работы за цикл, с;  
 $\sum t_{\text{пп}}$  – суммарное время переходных процессов за цикл, с;  
 $t_i$  – время работы на  $i$ -ом участке, с;  
 $\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -ом участке.

Определив по таблицам 7.3 – 7.8 эквивалентный ток двигателя для каждого переходного режима двигателя, а также используя вычисленные величины тока в рабочих точках  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ , вычислим выражение:

$$\begin{aligned} \sum (I_{\text{э}i}^2 \cdot t_i) &= I_{\text{э}3}^2 \cdot t_{\text{пп}3} + I_{\text{э}4}^2 \cdot t_{\text{пп}4} + I_{\text{э}1}^2 \cdot t_{\text{пп}1} + I_{c1}^2 \cdot t_{p1} + I_{\text{э}5\_1}^2 \cdot t_{\text{пп}5\_1} + \\ &+ I_{\text{э}5\_2}^2 \cdot t_{\text{пп}5\_2} + I_{c2}^2 \cdot t_{p2} + I_{\text{э}6}^2 \cdot t_{\text{пп}6} = 256,6^2 \cdot 0,484 + 257,1^2 \cdot 0,26 + \\ &+ 238,2^2 \cdot 0,21 + 174,591^2 \cdot 65 + 152,2^2 \cdot 0,223 + 82,75^2 \cdot 0,595 + 126,234^2 \cdot 90 + \\ &+ 256,8^2 \cdot 0,622 = 3,526 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}. \end{aligned}$$

Далее вычислим величину коэффициента, учитывающего ухудшение теплоотдачи двигателя в переходных режимах:

$$b_{\text{п}} = \frac{1 + b_0}{2} = \frac{1 + 0,5}{2} = 0,75.$$

Суммарное время переходных процессов за рабочий цикл составит:

$$\begin{aligned} \sum t_{\text{пп}i} &= t_{\text{пп}3} + t_{\text{пп}4} + t_{\text{пп}1} + t_{\text{пп}5\_1} + t_{\text{пп}5\_2} + t_{\text{пп}6} = \\ &= 0,484 + 0,26 + 0,21 + 0,223 + 0,595 + 0,622 = 2,384 \text{ с}. \end{aligned}$$

Используя вычисленные значения, найдем эквивалентный ток двигателя за цикл работы:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum (I_{\text{э}i}^2 \cdot t_i)}{\sum (\beta_i \cdot t_{pi}) + \beta_{\text{п}} \cdot \sum t_{\text{пп}i}}} = \sqrt{\frac{3,526 \cdot 10^6}{0,95 \cdot 65 + 1 \cdot 90 + 0,75 \cdot 2,384}} = 151,538 \text{ A}.$$

При повторно-кратковременном режиме работы эквивалентные величины пересчитываются на каталожные значения продолжительности включения и длительности работы.

Определим относительную продолжительность включения с учетом переходных режимов двигателя:

$$\text{ПВ}_{\text{э}} = \frac{\sum t_{pi} + \sum t_{\text{пп}i}}{\sum t_{pi} + \sum t_{\text{пп}i} + \sum t_{\text{паузи}}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

При подстановке численных значений параметров получим:

$$\text{ПВ}_{\text{э}} = \frac{65 + 90 + 2,384}{65 + 90 + 2,384 + 80} \cdot 100 \text{ \%} = 66,299 \text{ \%}.$$

Пересчитаем эквивалентное значение тока на стандартное значение:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{э}}}{\text{ПВ}_{\text{к}}}} = 151,538 \cdot \sqrt{\frac{66,299}{100}} = 123,4 \text{ A}.$$

Пересчитанная величина тока  $I_{\text{к}}$  сопоставляется с номинальной величиной тока  $I_{\text{н}}$  выбранного двигателя. При этом должно выполняться условие:

$$I_K \leq I_H,$$

где  $I_K$  – пересчитанная на каталожную эквивалентная величина тока, А;

$I_H$  – номинальное значение тока;  $I_H = 165$  А;

$$123,4 \text{ А} < 165 \text{ А}.$$

Условие проверки двигателя на нагрев выполняется, следовательно электродвигатель выбран правильно.

На перегрузочную способность двигателя постоянного тока независимого возбуждения можно не проверять, т. к. условия перегрузки учитывались при построении пусковых электромеханических характеристик.

### 7.7. Схема управления электроприводом

Схема силовой якорной цепи электропривода приведена на рис. 7.18. Схема подключается к напряжению постоянного тока  $U$  через автоматические выключатели  $QF1$  и предохранители  $FU1$ . Она включает в себя обмотку якоря двигателя  $M$ , резисторы  $R_{до61} - R_{до66}$ , которые в разные моменты времени задействованы как пусковые, регулировочные и тормозные. Силовые контакты схемы  $KM6.2$  и  $KM6.3$  обеспечивают торможение противовключением на завершающем этапе рабочего цикла при разомкнутых контактах  $KM0.4$  и  $KM0.5$ . В силовую якорную цепь включена обмотка реле максимального тока  $KA1$ .

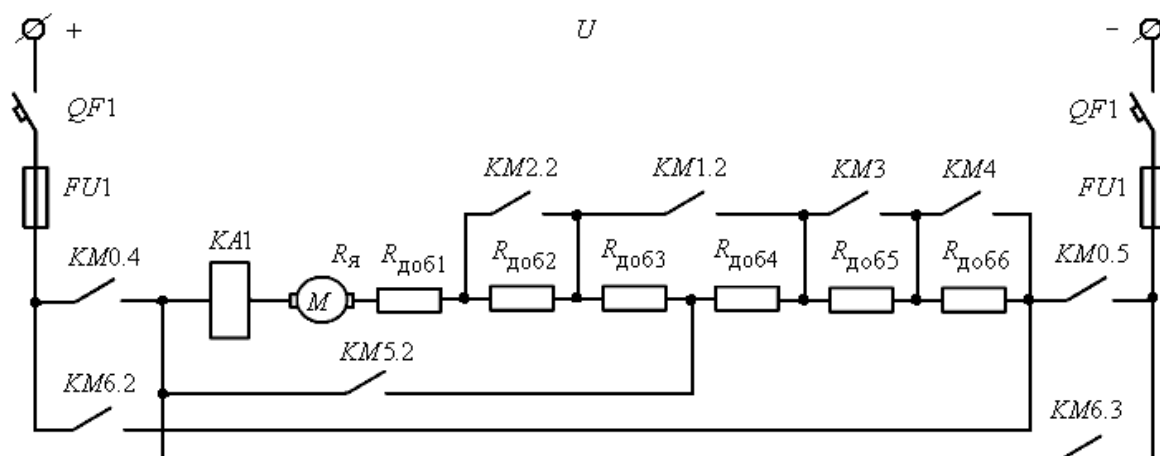


Рис. 7.18. Схема силовой якорной цепи электропривода

Релейно-контакторная схема управления электроприводом приведена на рис. 7.19. Электропривод работает следующим образом. Перед пуском электропривода включают автоматы  $QF1$  и  $QF2$ . На схему силовых цепей и схему управления подается напряжение  $U$ . В схеме

управления электроприводом запитывается обмотка возбуждения электродвигателя  $LM$ , срабатывает реле обрыва поля  $KA2$ , замыкая свои контакты  $KA2.1$  и  $KA2.2$  в цепях контакторов  $KM0$  и  $KM6$ . Через замыкающие контакты  $KM0.1$ ,  $KM1.1$ ,  $KM2.1$ ,  $KM5.3$  и  $KM6.4$  запитываются реле времени  $KT1$ ,  $KT2$  и  $KT3$ . Реле времени  $KT1$ ,  $KT2$ , включившись, размыкают свои контакты  $KT1$  и  $KT2$  в цепях схемы управления. Реле времени  $KT3$  при включении замыкает свои контакты  $KT3.1$ ,  $KT3.2$ ,  $KT3.4$ ,  $KT3.5$  и размыкает контакт  $KT3.3$ . Через замкнутый контакт  $KT3.4$  получает питание реле времени  $KT4$  и, в свою очередь, замыкает контакты  $KT4.1$  –  $KT4.4$ , запитывая реле времени  $KT5$  и контакторы  $KM3$ ,  $KM4$ , а также размыкает контакт  $KT4.5$ . Контакторы  $KM3$  и  $KM4$ , своими контактами шунтируют добавочные сопротивления  $R_{доб5}$  и  $R_{доб6}$ . Реле времени  $KT5$ , включившись, размыкает свои замыкающие контакты  $KT5.1$ ,  $KT5.2$  и  $KT5.4$ , а также замыкает размыкающие контакты  $KT5.3$  и  $KT5.5$ . Через контакт  $KT5.3$  получает питание реле времени  $KT6$  и замыкает контакты  $KT6.1$ ,  $KT6.2$ . Реле времени  $KT7$  не подключено, поэтому его контакт в цепи питания схемы управления замкнут. Схема подготовлена к включению.

Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки  $SB1$ : если реле максимального тока  $KA1$  находится в выключенном состоянии, а реле обрыва поля  $KA2$  включено, то срабатывает контактор  $KM0$ , подключая обмотку якоря  $M$  двигателя к сети напряжения постоянного тока  $U$ , и двигатель начинает разгоняться по первой пусковой характеристике 3, рис. 7.13 с введенными сопротивлениями  $R_{доб1}$  –  $R_{доб4}$ , рис. 7.18. Контакт  $KM0.2$  осуществляет самоблокировку контактора  $KM0$ , контакт  $KM0.3$  запитывает обмотку электромагнитного растормаживателя  $LB$ , а контакт  $KM0.1$  размыкается и снимает питание с реле времени  $KT1$ . Реле времени  $KT1$ , потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени разгона по первой пусковой характеристике до скорости  $w_{пер1}$ . По истечении 0,484 с. размыкающий контакт  $KT1$  замкнется и включится контактор  $KM1$ . Контактор  $KM1$ , включившись, закорачивает контактом  $KM1.2$  резисторы  $R_{доб3}$  и  $R_{доб4}$ , рис. 7.18, а также одновременно контактом  $KM1.1$  отключает катушку реле времени  $KT2$  и оно начинает отсчитывать время разгона по второй пусковой характеристике 4, рис. 7.13 до скорости  $w_{пер2}$ . По истечении времени выдержки (0,26 с.) размыкающий контакт  $KT2$  замкнется и включится контактор  $KM2$ . Контактор  $KM2$ , включившись, закорачивает контактом  $KM2.2$  резистор  $R_{доб2}$ , рис. 7.18, а контактом  $KM2.1$  отключает реле времени  $KT3$  и оно начинает отсчитывать время разгона до первой рабочей

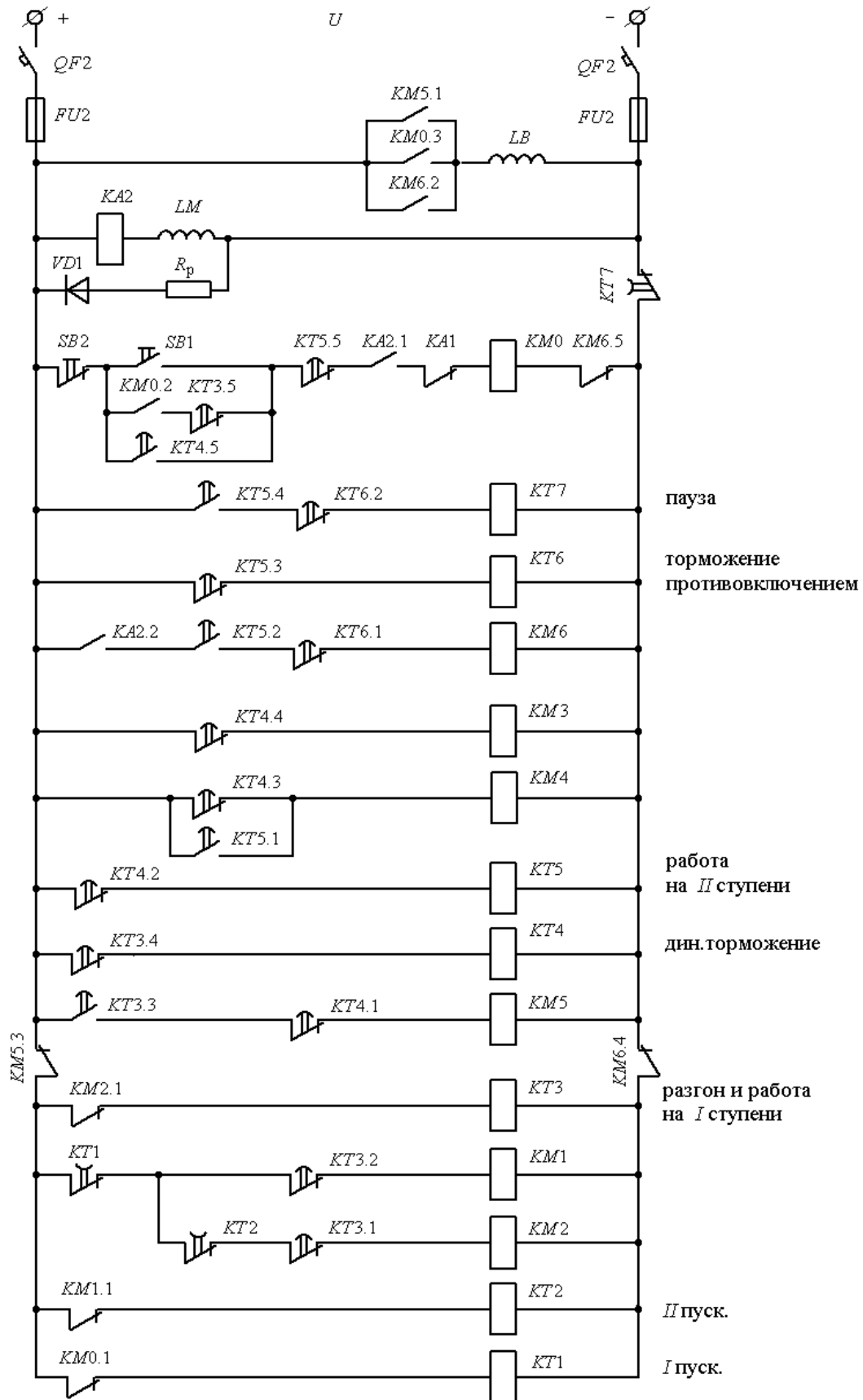


Рис. 7.19. Схема управления электроприводом

скорости  $\omega_{p1}$  (0,21 с.) плюс время работы в первой рабочей точке – 65 с. После работы на первой технологической характеристике 1, рис. 7.13 реле времени *КТ3* размыкает свои контакты *КТ3.1*, *КТ3.2*, *КТ3.4*, *КТ3.5* и тем самым отключает контакторы *КМ0*, *КМ1*, *КМ2*, реле времени *КТ4*, а контактом *КТ3.3* запитывает контактор *КМ5*. Двигатель переходит в режим динамического торможения (характеристика 5, рис. 7.13) для перехода во вторую рабочую точку. В якорную цепь двигателя включены сопротивления  $R_{доб1} - R_{доб3}$ , рис. 7.18, которые и формируют сопротивление динамического торможения номиналом 0,505 Ом. По истечении времени 0,818 с. размыкаются контакты *КТ4.1* – *КТ4.4* и отключают контакторы *КМ5*, *КМ3*, *КМ4* и реле времени *КТ5*. Одновременно контакт *КТ4.5* реле времени *КТ4* замыкается и включает контактор *КМ0*, после чего двигатель начинает работу во второй рабочей точке со скоростью  $\omega_{p2}$ . Через 90 с. реле времени *КТ5* размыкает контакты *КТ5.3* и *КТ5.5*, тем самым включает отсчет реле времени *КТ6* и отключает контактор *КМ0*. Одновременно путем замыкания контактов *КТ5.1*, *КТ5.2* и *КТ5.4* включаются контакторы *КМ4*, *КМ6*, а также реле времени *КТ7* и двигатель переходит в режим торможения противовключением (характеристика 6, рис. 7.13). По истечении времени торможения противовключением (0,622 с.) размыкающий контакт *КТ6.1* разомкнется и отключит контактор *КМ6*, который силовыми контактами *КМ6.1* – *КМ6.3* обесточит якорную цепь двигателя, а также электромагнитный растормаживатель *ЛВ*. Механизм остановлен. Одновременно с этим, размыкающий контакт *КТ6.2* отключает питание реле времени *КТ7*, оно разрывает свой контакт, снимая питание со всей схемы управления и начинает отсчет времени паузы. Повторное включение двигателя должно произойти через интервал времени паузы – 80 с. Контакт *КТ7* замыкается, напряжение *U* вновь поступает на схему управления, производится подготовка к включению, описанная выше, и схема опять готова к выполнению нового технологического цикла, запуск которого начнется либо по нажатию кнопки *SB1*, либо замыканием контакта какого-либо внешнего устройства, подключенного параллельно контакту кнопки *SB1*.

Следует отметить, что приведенная схема является лишь одним вариантом реализации системы управления. Возможно добавление дополнительных защит и блокировок, а также применение принципа управления не по времени, а по скорости.

Также возможны менее трудоемкие варианты построения схемы управления рассмотренным технологическим циклом на базе регулируемых командоаппаратов, например КА4000, КА4600 или на базе программируемых многоканальных реле, например ПР110.

## 8. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Задание на проектирование: Разработать электропривод производственного механизма, удовлетворяющего следующим техническим условиям и требованиям:

1. В качестве регулируемого электропривода принять привод переменного тока индивидуального изготовления с параметрическим регулированием скорости изменением активного сопротивления в цепи обмотки ротора.

2. Кинематическая схема электропривода имеет вид:

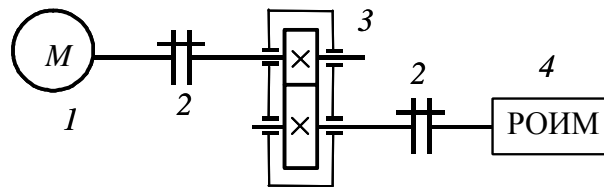


Рис. 8.1. Кинематическая схема электропривода:  
1 – асинхронный двигатель; 2 – муфта; 3 – редуктор;  
4 – рабочий орган исполнительного механизма

3. Электропривод должен обеспечить следующие технологические частоты вращения рабочего органа производственного механизма и время работы на этих частотах вращения:

Первая технологическая частота вращения механизма  $n_{M1} = 20 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

Время работы на первой технологической частоте вращения  $t_1 = 20$  с.

Вторая технологическая частота вращения механизма  $n_{M2} = 80 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

Время работы на второй технологической частоте вращения  $t_2 = 30$  с.

Время паузы  $t_{\text{п}} = 110$  с.

Момент сопротивления механизма  $M_{\text{мех}} = 500$  Н·м.

Характер нагрузки – реактивная.

КПД передачи при максимальной частоте вращения – 0,95.

Момент инерции механизма  $J_{\text{м}} = 20$  кг·м<sup>2</sup>.



## 8.1. Выбор типа электропривода

Основными факторами, определяющими род тока, тип и конструктивное исполнение двигателя, являются:

- показатели регулирования скорости (диапазон, плавность, стабильность скорости и т. д.);
- режим работы производственного механизма;
- производительность и надежность установки;
- основные затраты и эксплуатационные расходы на электрооборудование.

В данной работе расчет электропривода производится с асинхронным двигателем с фазным ротором, без учета технико-экономических показателей, на основании технического задания.

## 8.2. Построение диаграмм производственного механизма

### Построение диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы производственного механизма

Построим диаграммы скорости и нагрузочную диаграмму производственного механизма.

Для построения диаграммы скорости и нагрузочной диаграммы рассчитаем время полного цикла работы электропривода и угловые скорости производственного механизма.

Время цикла работы механизма

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{п}},$$

где  $t_{\text{р1}}$  – время работы с частотой вращения  $n_1 = 20$  об/мин;

$t_{\text{р2}}$  – время работы с частотой вращения  $n_2 = 80$  об/мин;

$t_{\text{п}}$  – время паузы;

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р1}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{п}} = 20 + 30 + 110 = 160 \text{ с.}$$

Произведем пересчет частот вращения  $n_i$  рабочего органа производственного механизма на угловые скорости  $\omega_i$  в соответствии с выражением

$$\omega_i = \frac{\pi \cdot n_i}{30}.$$

Первая технологическая скорость механизма

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} = \frac{3,1415 \cdot 20}{30} = 2,093 \text{ рад/с.}$$

Вторая технологическая скорость механизма

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = \frac{3,1415 \cdot 80}{30} = 8,373 \text{ рад/с.}$$

По данным расчетов произведем построение тахограммы и нагрузочной диаграммы производственного механизма, результаты построений приведены на рис. 8.2 и рис. 8.3.

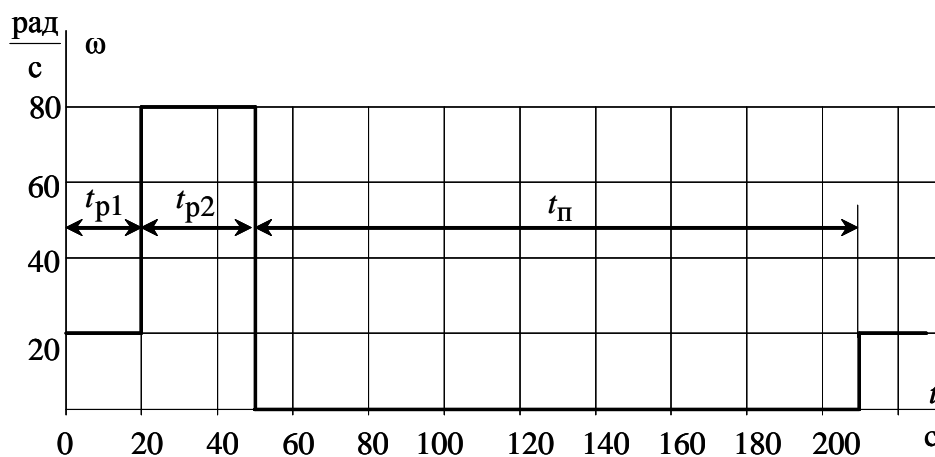


Рис. 8.2. Диаграмма скорости производственного механизма

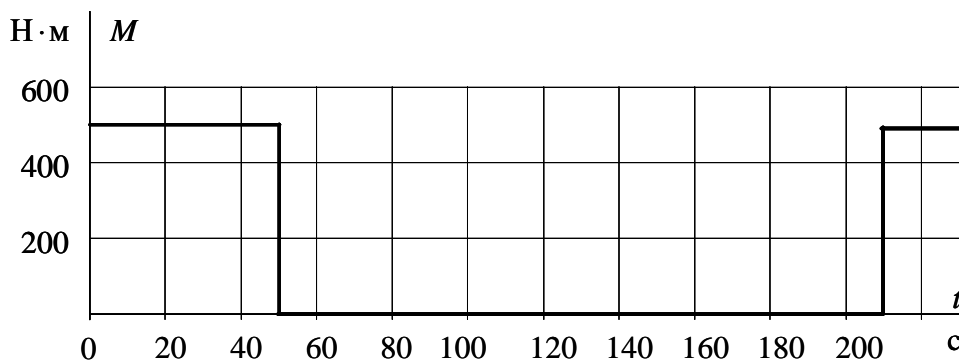


Рис. 8.3. Нагрузочная диаграмма производственного механизма для реактивной нагрузки

### 8.3. Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу

Анализ приведенных тахограммы и нагрузочной диаграммы производственного механизма показывает, что рассматриваемый электропривод работает в повторно-кратковременном режиме работы.

Для повторно-кратковременного режима работы электродвигателя последовательность выбора двигателя по мощности следующая.

По нагрузочной диаграмме механизма (нагрузки отнесены к валу механизма) определяется среднеквадратичное значение мощности за время работы с помощью формулы [1]

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( \frac{P_i \cdot \omega_{\text{max}}}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{pi}}}, \text{ кВт},$$

где  $m$  – число рабочих участков в цикле;

$P_i$  – мощность на  $i$ -м интервале;

$t_{pi}$  – продолжительность  $i$ -го интервала;

$\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -м интервале, соответствующий значению угловой скорости  $\omega_i$  на этом интервале;

$\omega_{\text{max}}$  – максимальная скорость производственного механизма.

При найденных угловых скоростях  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и заданном моменте  $M_i$  производственного механизма определяем мощность при работе на каждой технологической скорости

$$P_i = M_i \cdot \omega_i \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}.$$

Мощность при работе на первой технологической скорости

$$P_1 = M_1 \cdot \omega_1 \cdot 10^{-3} = 500 \cdot 2,093 \cdot 10^{-3} = 1,047 \text{ кВт}.$$

Мощность при работе на второй технологической скорости

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 \cdot 10^{-3} = 500 \cdot 8,373 \cdot 10^{-3} = 4,187 \text{ кВт}.$$

Приближенно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной [1]:

$$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{\text{max}}},$$

где  $\beta_0$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре.

Примерные значения коэффициента  $\beta_0$  для двигателей различного исполнения приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Исполнение двигателя	$\beta_0$
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ÷ 0,98
Закрытый самовентилируемый	0,45 ÷ 0,55
Самовентилируемый защищенный	0,25 ÷ 0,35

Для асинхронного двигателя с фазным ротором, выполненного в закрытом самовентилируемом исполнении, коэффициент ухудшения теплоотдачи  $\beta_0 = 0,45 \div 0,55$ . Принимаем  $\beta_0 = 0,5$ .

Тогда для каждой из технологических скоростей

$$\beta_1 = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{\max}} = 0,5 + (1 - 0,5) \frac{2,093}{8,373} = 0,625;$$

$$\beta_2 = \beta_0 + (1 - \beta_0) \cdot \frac{\omega_2}{\omega_{\max}} = 0,5 + (1 - 0,5) \frac{8,373}{8,373} = 1.$$

Среднеквадратичное значение мощности за время работы

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_1 \omega_{\max}}{\omega_1}\right)^2 t_{p1} + \left(\frac{P_2 \omega_{\max}}{\omega_2}\right)^2 t_{p2}}{\beta_1 \cdot t_{p1} + \beta_2 \cdot t_{p2}}} = \sqrt{\frac{1,04^2 \cdot 20 + 4,19^2 \cdot 30}{0,625 \cdot 20 + 1 \cdot 30}} = 3,6 \text{ кВт.}$$

Найдем расчетную продолжительность включения

$$\text{ПВ}_{\text{расч}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{j=1}^n t_{пj}} 100 \%,$$

где  $t_{pi}$  – продолжительность  $i$ -го интервала времени работы в цикле;

$m$  – число рабочих интервалов в цикле;

$t_{пj}$  – продолжительность  $j$ -го интервала времени паузы в цикле;

$n$  – число пауз в цикле.

В данном случае  $n = 1$ , тогда

$$\text{ПВ}_{\text{расч}} = \frac{20 + 30}{20 + 30 + 110} 100 \% = 31,25 \%$$

Пересчитаем среднеквадратичную мощность на ближайшую каталожную продолжительность включения:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_{\text{к}}}}, \text{ кВт,}$$

где  $\text{ПВ}_{\text{к}}$  – ближайшая к расчетной каталожная продолжительность включения. Каталожная продолжительность включения выбирается из ряда номинальных значений: 15 %, 25 %, 40 %, 60 %, 100 %.

Проводим расчеты для  $\text{ПВ}_{\text{к1}} = 25 \%$  и  $\text{ПВ}_{\text{к2}} = 40 \%$ .

Каталожные мощности:

$$P_{\text{к1}} = P_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{э}}}{\text{ПВ}_{\text{к1}}}} = 3,59 \cdot \sqrt{\frac{31,25}{25}} = 4,014 \text{ кВт;}$$

$$P_{к2} = P_9 \cdot \sqrt{\frac{ПВ_9}{ПВ_{к2}}} = 3,59 \cdot \sqrt{\frac{31,25}{40}} = 3,173 \text{ кВт.}$$

Определяем расчетную мощность двигателя

$$P_{расч} = P_{к} \cdot \frac{k_3}{\eta_{п}}, \text{ кВт,}$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий отличие нагрузочной диаграммы двигателя от диаграммы механизма: принимаем  $k_3 = 1,1$ ;

$\eta_{п}$  – коэффициент полезного действия передачи,  $\eta_{п} = 0,95$ ;

$$ПВ_{к1} = 25 \% , P_{расч1} = P_{к1} \cdot \frac{k_3}{\eta_{п}} = \frac{4,014 \cdot 1,1}{0,95} = 4,648 \text{ кВт};$$

$$ПВ_{к2} = 40 \% , P_{расч2} = P_{к2} \cdot \frac{k_3}{\eta_{п}} = \frac{3,173 \cdot 1,1}{0,95} = 3,674 \text{ кВт.}$$

По каталогу выбираем несколько электродвигателей ближайшей большей мощности с различными номинальными частотами вращения. Тип и основные параметры двигателей сведем в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	ПВ, %
МТН112-6	5	930	0,056	40
МТФ112-6	5,8	915	0,27	25
МТМ211-6	5	920	0,115	40
МТН112-6	5,3	885	0,27	25
МТ112-6	5	925	0,0675	25
МТФ112-6	5	930	0,068	40

Для каждого из выбранных двигателей вычислим:

- номинальную скорость:

$$\omega_{ндi} = \frac{n_{ди} \cdot \pi}{30}, \text{ рад/с;}$$

- передаточное отношение (число) редуктора:

$$i_{pi} = \frac{\omega_{ндi}}{\omega_{\max m}},$$

где  $\omega_{нд}$  – номинальная скорость двигателя;

$\omega_{\max m}$  – максимальная скорость производственного механизма;

- передаточное отношение (число) редуктора:

$$i_{pi} = \frac{\omega_{ндi}}{|\omega_{max м}|};$$

- промышленность выпускает одно-, двух- и трехступенчатые редукторы с передаточным числом из стандартного ряда [3]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,1; 8,0; 9,0.

Необходимое стандартное передаточное отношение редуктора можно найти следующим образом:

$$i_{ст p} = i_{ст i} \cdot 10^x,$$

где  $i_{ст i}$  – стандартное передаточное число редуктора;  
 $x$  – целое число.

Стандартное передаточное отношение редуктора выбирается ближайшее меньшее к расчетному:

$$i_{ст p} \leq i_{pi}.$$

- оптимальное по условию минимизации времени пуска передаточное отношение редуктора:

$$i_{опт i} = \sqrt{\frac{J_{м}}{k \cdot J_{дв i}}},$$

где  $J_{м}$  – момент инерции производственного механизма;  $J_{м} = 20$ ;

$J_{дв i}$  – момент инерции ротора двигателя;

$k = 1,05 \div 1,3$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора. Принимаем  $k = 1,1$ ;

- отношение стандартного передаточного отношения редуктора  $i_{ст pi}$  к оптимальному передаточному отношению  $i_{опт i}$ :

$$\Theta = \frac{i_{ст pi}}{i_{опт i}}.$$

Данные расчетов по каждому двигателю сведем в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Тип двигателя	Номинальная скорость двигателя $\omega_{ндi}$	$i_p$	$i_{ст p}$	$i_{опт}$	$\Theta_i$
МТН112-6	97,34	11,63	11,2	18,08	0,62
МТФ112-6	95,77	11,44	11,2	8,21	1,36
МТМ211-6	96,29	11,50	11,2	12,25	0,91
МТН112-6	92,63	11,06	10,0	8,21	1,22
МТ112-6	96,81	11,56	11,2	16,41	0,68
МТФ112-6	97,34	11,63	11,2	16,35	0,69

Двигатель с  $\Theta_i$ , наиболее приближенной к единице, принимается в качестве приводного. Для дальнейших расчетов выбираем двигатель типа МТМ211-6 с паспортными данными, которые сведем в табл. 8.4.

Таблица 8.4

$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/мин	$U_{1лн}$ , В	$\cos\varphi_H$ , о. е.	$I_{1н}$ , А	$R_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом	$k_{max} = \frac{M_{max}}{M_H}$ , о. е.
5,0	920	380	0,75	13,6	1,41	1,29	2,5
9,7	215	16,2	0,58	0,66	1,76	0,115	120

Окончание табл. 8.4

$I_0$ , А	$E_{2н}$ , В	$I_{2н}$ , А	$R_2$ , Ом	$X_{2\sigma}$ , Ом	$k_e$ , о. е.	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	$Q$ , кг
9,7	215	16,2	0,58	0,66	1,76	0,115	120

В таблице приняты следующие обозначения физических величин:  
 $P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  
 $n_H$  – номинальная частота вращения, об/мин;  
 $U_{1лн}$  – номинальное фазное напряжение, В;  
 $\cos\varphi_H$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о. е.;  
 $I_{1н}$  – номинальный ток статора двигателя, А;  
 $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$x_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом;

$k_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_H}$  – кратность максимального момента, о. е.;

$I_0$  – ток статора холостого хода, А;

$E_{2H}$  – ЭДС между кольцами неподвижного разомкнутого ротора, В;

$I_{2H}$  – номинальный ток ротора двигателя, А;

$R_2$  – активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$X_{2\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, Ом;

$k_e$  – коэффициент трансформации ЭДС, о. е.;

$J_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора, кг·м<sup>2</sup>;

$Q$  – масса двигателя, кг.

Для найденного передаточного отношения редуктора определим приведенный к валу двигателя момент сопротивления при реактивной нагрузке

$$M_{ci} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}}, \text{Н} \cdot \text{м},$$

где  $M_{\text{мех}}$  – момент механизма, Н·м;

$i_{\text{ст.р}}$  – стандартное передаточное число редуктора;

$\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи при максимальной частоте вращения;

$$M_{ci} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}} = \frac{500}{0,95 \cdot 11,2} = 46,99 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

#### 8.4. Построение естественных механической и электромеханических характеристик электродвигателя

Определим параметры схемы замещения асинхронного двигателя.

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2' = R_2 \cdot k_e^2 = 0,58 \cdot 1,76^2 = 1,797 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} \cdot k_e^2 = 0,66 \cdot 1,76^2 = 2,044 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\text{кз}} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = 1,29 + 2,04 = 3,33 \text{ Ом}.$$

Синхронная частота вращения  $n_0$  для промышленной частоты сети  $f_{1H} = 50$  Гц может быть найдена из табл. 8.5 как ближайшая большая



к номинальной частоте вращения  $n_H = 920 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ , в зависимости от числа пар полюсов  $p$ .

Таблица 8.5

$p$	1	2	3	4	5	6
$n_0$	3000	1500	1000	750	600	500

Таким образом, синхронная частота вращения равна  $n_0 = 1000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

В этом случае синхронная скорость  $\omega_0$  двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Расчет естественной механической характеристики асинхронного двигателя произведем в соответствии с выражением:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + R_2' \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2]} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,797}{104,7 \cdot s \cdot [(1,41 + 1,797/s)^2 + (1,29 + 2,044)^2]}.$$

Механическая характеристика, рассчитанная в математической системе MathCAD, приведена на рис. 8.4.

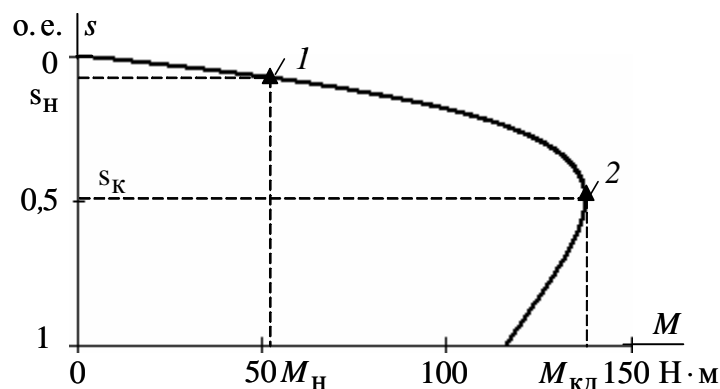


Рис. 8.4. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя типа МТМ211-6:  
1 – момент номинальный; 2 – момент критический

Определим дополнительные параметры двигателя:

- Момент критический двигательного режима (электромагнитный)

$$M_{\text{кд}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \left( 1,41 + \sqrt{1,41^2 + 3,33^2} \right)} = 137,965 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Критическое скольжение:

$$s_{\text{к}} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \pm \frac{1,797}{\sqrt{1,41^2 + 3,33^2}} = \pm 0,497 \text{ о. е.}$$

- Номинальная скорость двигателя:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 920}{30} = 96,29 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

- Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{5000}{96,29} = 51,93 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

- Максимальный момент (на валу) двигателя:

$$M_{\text{к}} = k_{\text{max}} \cdot M_{\text{н}} = 2,5 \cdot 51,93 = 129,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент на валу двигателя  $M_{\text{к}}$  меньше, чем электромагнитный критический момент двигательного режима  $M_{\text{кд}}$ , за счет потерь в самом двигателе.

Номинальный электромагнитный момент асинхронного двигателя  $M_{\text{нэ}}$ , определенный при номинальном скольжении  $s_{\text{н}} = 0,08$  по механической характеристике, составляет  $M_{\text{нэ}} = 53,62 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Найденные координаты точек с номинальным и критическим моментами двигателя нанесены на рассчитанный график (см. рис. 8.4) естественной механической характеристики асинхронного двигателя в виде треугольников.

Расчет естественной электромеханической характеристики асинхронного двигателя  $I_2' = f(s)$  произведем по выражению:

$$I_2' = \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{\left( 1,41 + \frac{1,797}{s} \right)^2 + 3,33^2}}.$$

График электромеханической характеристики  $I_2' = f(s)$ , рассчитанный в математической системе MathCAD, приведен на рис. 8.5.

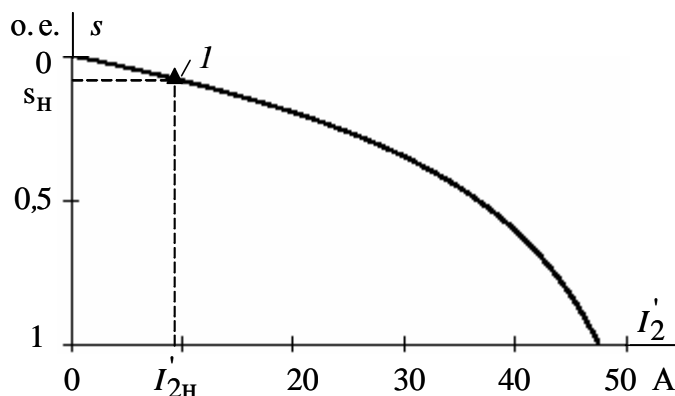


Рис. 8.5. График электромеханической характеристики  $I_2' = f(s)$ :  
 $I$  – координаты точки с номинальными параметрами двигателя

Номинальный ток ротора двигателя  $I_{2H} = 16,2 \text{ A}$ .

Найдем номинальный ток ротора, приведенный к обмотке статора:

$$I_{2H}' = \frac{I_{2H}}{k_e} = \frac{16,2}{1,76} = 9,2 \text{ A}.$$

Номинальный ток ротора, приведенный к обмотке статора  $I_{2H}'$ , определенный по электромеханической характеристике при номинальном скольжении  $s_H = 0,08$ , составляет  $I_{2H}' = 9,13 \text{ A}$ .

Расчет естественной электромеханической характеристики  $I_1 = f(s)$  произведем с учетом найденных значений тока  $I_2'$ , в соответствии с уравнением:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin\varphi_2} = \sqrt{9,7^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 9,7 \cdot I_2' \cdot \sin\varphi_2},$$

где

$$\sin\varphi_2 = \frac{x_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}} = \frac{3,33}{\sqrt{\left(1,41 + \frac{1,797}{s}\right)^2 + 3,33^2}}.$$

График электромеханической характеристики  $I_1 = f(s)$  приведен на рис. 8.6.

Номинальный ток статора по паспортным данным двигателя  $I_{1H} = 13,6 \text{ A}$ .

Номинальный ток статора асинхронного двигателя, при номинальном скольжении  $s_H = 0,08$ , определенный по электромеханической характеристике,  $I_{1H} = 14,2 \text{ A}$ .

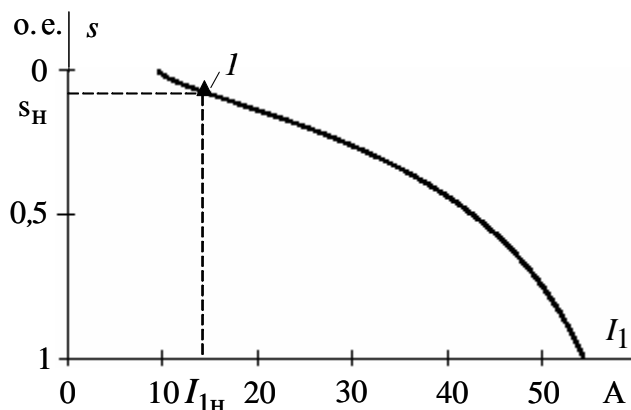


Рис. 8.6. График естественной электромеханической характеристики  $I_1 = f(s)$  асинхронного двигателя:  
 $I$  – координаты точки с номинальными параметрами двигателя

Значения номинального тока статора, тока ротора, приведенного к обмотке статора, номинального и критического моментов асинхронного двигателя, определенные по его естественным характеристикам, практически совпадают со значениями, приведенными в каталожных данных, поэтому номинальные параметры асинхронного двигателя и параметры его схемы замещения не противоречат друг другу.

### 8.5. Расчет пусковых и регулировочных резисторов электропривода

Для построения реостатных механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя при известных параметрах схемы замещения двигателя необходимо знать величину добавочного сопротивления цепи обмотки ротора, приведенного к обмотке статора. Добавочное сопротивление легко определяется, если известны координаты какой-либо точки (кроме точки идеального холостого хода), принадлежащей, например, механической характеристике электропривода.

Наиболее часто такой точкой является заданная рабочая скорость или скольжение при известном статическом моменте, приведенном к валу двигателя.

Найдем статический момент механизма, приведенный к валу двигателя при реактивном характере нагрузки:

$$M_{ci} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $M_{\text{мех}}$  – момент механизма, Н·м;

$i_{\text{ст.р}}$  – стандартное передаточное число редуктора;

$\eta_{\text{п}}$  – КПД передачи при максимальной частоте вращения;

$$M_{\text{с1}} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{п}} \cdot i_{\text{ст.р}}} = \frac{500}{0,95 \cdot 11,2} = 46,992 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определим технологические скорости  $\omega_{\text{д}i}$  вращения двигателя:

$$\omega_{\text{д}i} = \omega_i \cdot i_{\text{ст.р}};$$

$$\omega_{\text{д1}} = \omega_1 \cdot i_{\text{ст.р}} = 2,093 \cdot 11,2 = 23,442 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{д2}} = \omega_2 \cdot i_{\text{ст.р}} = 8,373 \cdot 11,2 = 93,778 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для каждой из технологических скоростей найдем рабочие скольжения двигателя.

Для первой технологической скорости:

$$s_{\text{д1}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{д1}}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 23,442}{104,7} = 0,776 \text{ о. е.}$$

Для второй технологической скорости:

$$s_{\text{д2}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{д2}}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 93,778}{104,7} = 0,104 \text{ о. е.}$$

Добавочное сопротивление цепи обмотки ротора для первой технологической скорости определим в следующей последовательности.

Для найденного рабочего скольжения  $s_{\text{д1}}$  и статического момента  $M_{\text{с1}}$  определим критическое скольжение:

$$s_{\text{к1}} = s_{\text{д1}} \cdot \left\{ \frac{(1+q) \cdot M_{\text{кд}}}{M_{\text{с1}}} - q + \sqrt{\left[ \frac{(1+q) \cdot M_{\text{кд}}}{M_{\text{с1}}} - q \right]^2 - 1} \right\},$$

где  $q = a \cdot s_{\text{к1}} = \frac{R_1}{R_2'} \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}}$  – коэффициент.

Найдем

$$q = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,41}{\sqrt{1,41^2 + 3,33^2}} = 0,390.$$

После подстановки численных значений параметров получим:

$$s_{\text{к1}} = 0,776 \cdot \left\{ \frac{(1+0,39) \cdot 137,965}{46,992} - 0,39 + \sqrt{\left[ \frac{(1+0,39) \cdot 137,965}{46,992} - 0,39 \right]^2 - 1} \right\}.$$

Решение уравнения:  $s_{к1} = 5,621$ .

Тогда добавочное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора для первой технологической характеристики:

$$R'_{2д1} = s_{к1} \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} - R_2' = 5,621 \sqrt{1,41^2 + 3,33^2} - 1,797 = 18,53 \text{ Ом.}$$

Значение регулировочного сопротивления  $R_{2д1}$ , непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя, находится по выражению:

$$R_{2д1} = \frac{R'_{2д1}}{k_e^2} = \frac{18,53}{1,76^2} = 5,982 \text{ Ом.}$$

Добавочное сопротивление цепи обмотки ротора для второй технологической скорости определим в следующей последовательности.

Для найденного рабочего скольжения  $s_{д2}$  и статического момента  $M_{с1}$  определим критическое скольжение:

$$s_{к2} = s_{д2} \cdot \left\{ \frac{(1+q) \cdot M_{кд}}{M_{с1}} - q + \sqrt{\left[ \frac{(1+q) \cdot M_{кд}}{M_{с1}} - q \right]^2 - 1} \right\},$$

где  $q = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{1,41}{\sqrt{1,41^2 + 3,33^2}} = 0,390$  – коэффициент.

После подстановки численных значений параметров получим:

$$s_{к2} = 0,104 \cdot \left\{ \frac{(1+0,39) \cdot 137,965}{46,992} - 0,39 + \sqrt{\left[ \frac{(1+0,39) \cdot 137,965}{46,992} - 0,39 \right]^2 - 1} \right\}.$$

Решение уравнения:  $s_{к2} = 0,755$ .

Тогда добавочное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора для второй технологической характеристики:

$$R'_{2д2} = s_{к1} \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} - R_2' = 0,755 \sqrt{1,41^2 + 3,33^2} - 1,797 = 0,926 \text{ Ом.}$$

Значение регулировочного сопротивления  $R_{2д2}$ , непосредственно включаемого в роторную цепь двигателя при работе на второй технологической характеристике, находится по выражению:

$$R_{2д2} = \frac{R'_{2д2}}{k_e^2} = \frac{0,926}{1,76^2} = 0,299 \text{ Ом.}$$

Расчет механической характеристики асинхронного двигателя для технологических скоростей  $\omega_{д1}$  и  $\omega_{д2}$  произведем по уравнению:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (R_2' + R_{2\text{ди}}')}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + (R_2' + R_{2\text{ди}}') \cdot s^{-1})^2 + X_{\text{кн}}^2]}$$

После подстановки численных значений параметров расчетные уравнения механических характеристик для первой и второй технологических скоростей будут выглядеть следующим образом:

Для первой технологической характеристики:

$$M_1(s) = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1,393 + 18,53)}{104,7 \cdot s \cdot [(1,41 + (1,393 + 18,53)/s)^2 + 3,33^2]}$$

Для второй технологической характеристики:

$$M_2(s) = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1,393 + 0,926)}{104,7 \cdot s \cdot [(1,41 + (1,393 + 0,926)/s)^2 + 3,33^2]}$$

где  $s$  – скольжение.

Графики механических характеристик, рассчитанные в математической системе MathCAD, приведены на рис. 8.7 в осях координат  $(M, \omega)$ .

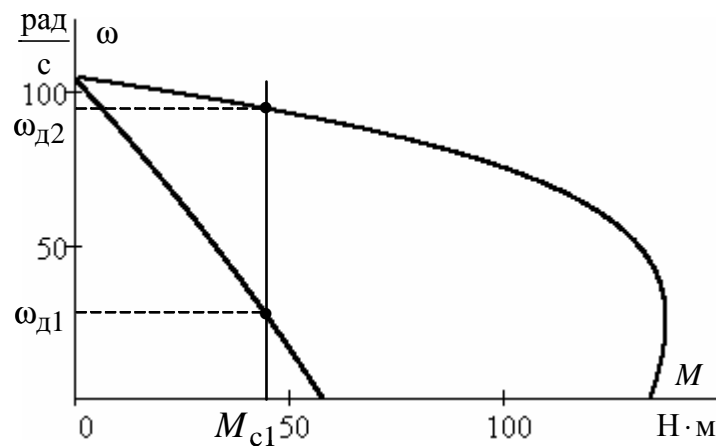


Рис. 8.7. Механические характеристики асинхронного двигателя для технологических скоростей  $\omega_{д1}$  и  $\omega_{д2}$

Так как для асинхронных двигателей с фазным ротором пуск, реверс, торможение, регулирование скорости необходимо осуществлять при наложенных на ток и момент ограничениях, то, как следует из анализа рис. 8.7, разгон двигателя до второй технологической скорости  $\omega_{д2}$  следует производить через промежуточные пусковые характеристики.

При этом максимальные пусковые пики моментов  $M_{\text{мах пуск}}$  двигателя определяются из условия:

$$M_{\text{max пуск}} = 0,85 \cdot M_{\text{кд}} = 0,85 \cdot 137,965 = 117,27 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент переключения  $M_{\text{пер}}$  будем выбирать из условия:

$$M_{\text{пер}} \geq (1,1 - 1,3) \cdot M_{\text{н}} = 1,2 \cdot 51,93 = 62,32 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Схема силовых цепей, в случае разгона двигателя до скорости  $\omega_{\text{д2}}$  через две пусковые характеристики, для рассматриваемого технологического режима работы асинхронного электропривода приведена на рис. 8.8.

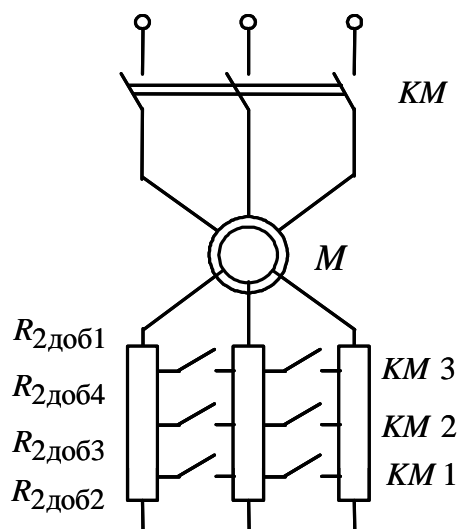


Рис. 8.8. Схема силовых цепей реостатного асинхронного электропривода

Порядок построения пусковых характеристик следующий:

- строятся регулировочные характеристики с заданными рабочими скоростями  $\omega_{\text{д1}}$  и  $\omega_{\text{д2}}$  (см. рис. 8.9). Строится первая пусковая механическая характеристика – 3, что соответствует работе электропривода с замкнутым контактом  $KM1$ . Из цепи обмотки ротора выводится добавочное сопротивление  $R_{2\text{доб2}}$ . Характеристика 3 проходит через две точки: синхронную скорость  $\omega_0$  при моменте двигателя, равном нулю ( $M = 0$ ), и допустимый момент  $M_{\text{max пуск}}$  при скорости, равной  $\omega_{\text{д1}}$ ;
- определяется момент переключения;  $M_{\text{пер}} \geq 62,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;
- в точке с координатами  $(M_{\text{пер}}, \omega_{\text{п1}})$  происходит закорачивание замыкающим контактом  $KM2$  добавочного сопротивления  $R_{2\text{доб3}}$  и двигатель переходит на пусковую характеристику 4. Таким образом, характеристика 4 проходит через две точки: синхронную скорость  $\omega_0$



при моменте двигателя, равном нулю ( $M = 0$ ), и скорость, равную  $\omega_{п1}$ , при допустимом моменте  $M_{\max \text{ пуск}}$ .

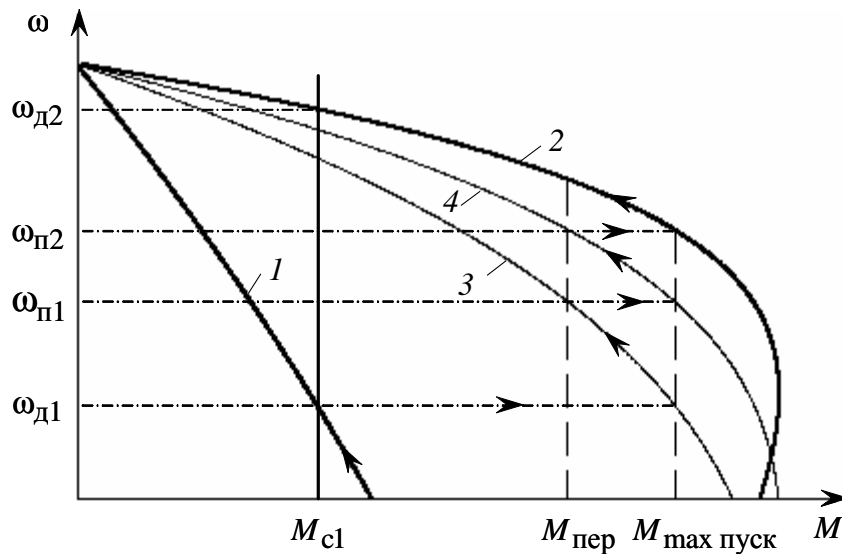


Рис. 8.9. Механические характеристики электропривода:  
 1 – первая технологическая механическая характеристика;  
 2 – вторая технологическая механическая характеристика;  
 3 – первая пусковая характеристика электропривода;  
 4 – вторая пусковая характеристика электропривода

Закорачивание добавочного сопротивления  $R_{2\text{доб4}}$  также необходимо производить при моменте переключения  $M_{\text{пер}}$ . Бросок момента при переходе двигателя на вторую технологическую характеристику должен быть равен допустимому моменту  $M_{\max \text{ пуск}}$ .

Если это не происходит, то момент переключения  $M_{\text{пер}}$  необходимо поменять, соответственно несколько увеличив или уменьшив его, однако если момент переключения становится меньше  $1,1 \cdot M_{\text{н}}$ , то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений.

Все построения выполним в математической системе MathCAD.

Так как построение пусковых характеристик произвели в математической системе MathCAD в численных значениях параметров, то пусковые добавочные сопротивления в цепи обмотки ротора определены в процессе построения этих характеристик и равны:

- для первой пусковой характеристики:

$$R'_{2п1} = 3,8 \text{ Ом};$$

- для второй пусковой характеристики:

$$R'_{2п2} = 2,1 \text{ Ом.}$$

Расчетные графики механических регулировочных и пусковых характеристик приведены на рис. 8.10.

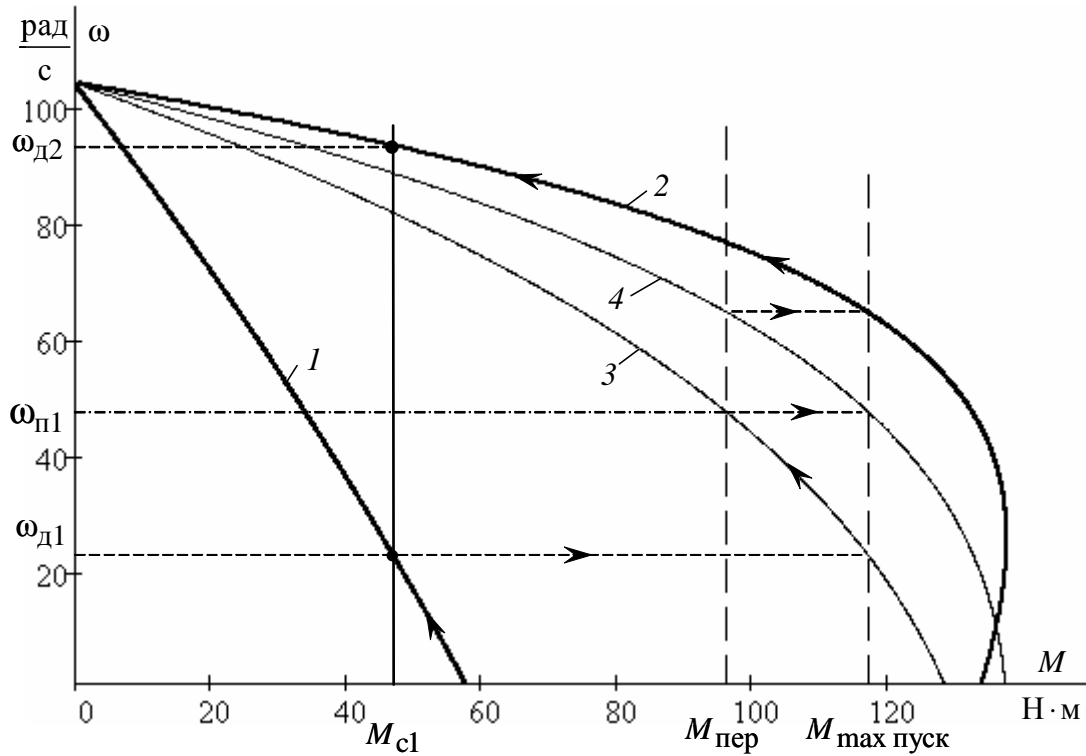


Рис. 8.10. Механические характеристики электропривода, рассчитанные в программной среде MathCAD: 1 – первая технологическая механическая характеристика; 2 – вторая технологическая механическая характеристика; 3 – первая пусковая характеристика электропривода; 4 – вторая пусковая характеристика электропривода

Значения пусковых сопротивлений  $R_{2пi}$ , включаемых в роторную цепь двигателя при пуске с первой на вторую технологическую характеристику, находятся следующим образом:

$$R_{2п1} = \frac{R'_{2п1}}{k_e^2} = \frac{3,8}{1,76^2} = 1,23 \text{ Ом;}$$

$$R_{2п2} = \frac{R'_{2п2}}{k_e^2} = \frac{2,1}{1,76^2} = 0,779 \text{ Ом.}$$

Найденные значения сопротивлений  $R_{2п1}$  и  $R_{2п2}$  позволяют определить все добавочные сопротивления цепи обмотки ротора в обозначениях, принятых на рис. 8.8 из уравнений:

$$R_{2д2} = R_{2доб1} = 0,299 \text{ Ом};$$

$$R_{2п2} = R_{2доб1} + R_{2доб4} = 0,779 \text{ Ом};$$

$$R_{2п1} = R_{2доб1} + R_{2доб4} + R_{2доб3} = 1,23 \text{ Ом};$$

$$R_{2д1} = R_{2доб1} + R_{2доб4} + R_{2доб3} + R_{2доб2} = 5,982 \text{ Ом}.$$

Совместное решение этих уравнений позволяет определить добавочные сопротивления, непосредственно включаемые в роторную цепь двигателя:  $R_{2доб1} = 0,299 \text{ Ом}$ ;  $R_{2доб2} = 4,752 \text{ Ом}$ ;  $R_{2доб3} = 0,451 \text{ Ом}$ ;  $R_{2доб4} = 0,48 \text{ Ом}$ .

Таким образом, все сопротивления пусковых и регулировочных резисторов найдены.

После работы на двух технологических скоростях двигатель необходимо остановить. Наиболее быстрые способы торможения электроприводов – электрические: торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное), торможение противовключением, динамическое торможение. В тех случаях, когда после торможения не должно происходить реверсирование электропривода, в релейно-контакторных электроприводах применяют динамическое торможение двигателя.

### **Расчет параметров и характеристик режима динамического торможения асинхронного двигателя**

Схема включения асинхронной электрической машины в режиме динамического торможения приведена на рис. 8.11. В электроприводах с асинхронными двигателями режим динамического торможения возникает при отключении обмоток статора от сети переменного напряжения контактором  $KМ$  и подключении ее через добавочное сопротивление динамического торможения  $R_{дт}$ , которое ограничивает ток статора на допустимом уровне, к источнику постоянного напряжения  $U_{п}$  контактором  $KМ$  4.

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронной машиной в режиме динамического торможения, определяется уравнением [11]:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кдт}}{\frac{v_k}{v} + \frac{v}{v_k}},$$

где  $v = \frac{\omega}{\omega_0}$  – относительная скорость;

$$v_k = \frac{R_2' + R_{2\text{доб}}'}{X_{mH} + X_{2\text{сн}}'} - \text{относительная критическая скорость};$$

$$M_{\text{кдт}} = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot X_{mH}^2}{2 \cdot \omega_0 (X_{mH} + X_{2\text{сн}}')} - \text{критический момент асинхронного}$$

двигателя в режиме динамического торможения.

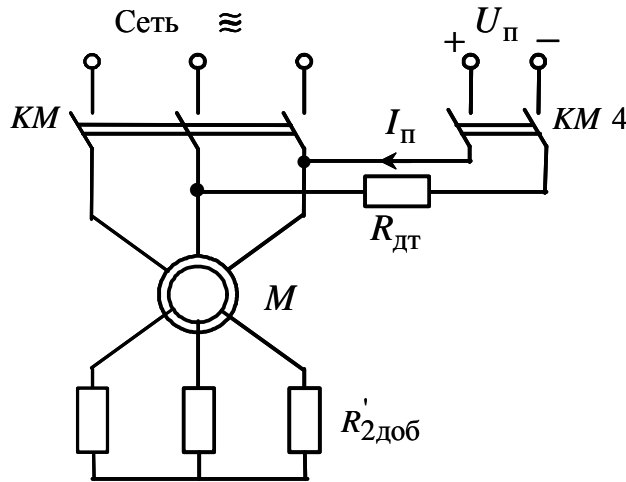


Рис. 8.11. Схема включения асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Критический момент асинхронной машины в режиме динамического торможения не должен превышать максимальный момент пусковых характеристик двигательного режима работы электрической машины:

$$M_{\text{кдт}} \leq M_{\text{max пуск}} = 0,85 \cdot M_{\text{кд}} = 0,85 \cdot 137,965 = 117,27 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В паспортных данных двигателя не приведено значение индуктивного сопротивления  $X_m$ , найдем его из выражения:

$$X_{mH} = \frac{E_m}{I_0}, \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания  $E_m$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_m = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi_{1H} - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1H}} - X_{1сн} \cdot I_{1H})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,75 - 1,41 \cdot 13,6)^2 + (220 \sqrt{1 - 0,75^2} - 1,29 \cdot 13,6)^2} = 194,014 \text{ В,}$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_{mH} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{194,014}{9,7} = 20,00 \text{ Ом.}$$

Найдем эквивалентный переменный ток статора:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\text{кдт}} (X_{\text{мн}} + X'_{2\text{сн}})}{3 \cdot X_{\text{мн}}^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 117,27 (20,0 + 2,044)}{3 \cdot 20,0^2}} = 21,239 \text{ А.}$$

Определим относительную критическую скорость:

$$v_{\text{к}} = \frac{R'_2}{X_{\text{мн}} + X'_{2\text{сн}}} = \frac{1,393}{20,0 + 2,044} = 0,0632 \text{ о. е.}$$

Добавочное сопротивление в цепи ротора отсутствует ( $R'_{2\text{доб}} = 0$ ).

Расчет механической характеристики асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения, произведем в абсолютных значениях скорости в соответствии с выражением:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кдт}}}{\frac{v_{\text{к}} \cdot \omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{v_{\text{к}}}} = \frac{2 \cdot 117,27}{\frac{0,0632 \cdot \omega_0}{\omega} + \frac{\omega}{0,0632 \cdot \omega_0}},$$

подставляя в него значения скорости от 0 до  $120 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Механическая характеристика динамического торможения асинхронного двигателя МТМ211-6 без добавочного сопротивления в цепи обмотки ротора, рассчитанная в математической системе MathCAD, приведена на рис. 8.12, кривая 1.

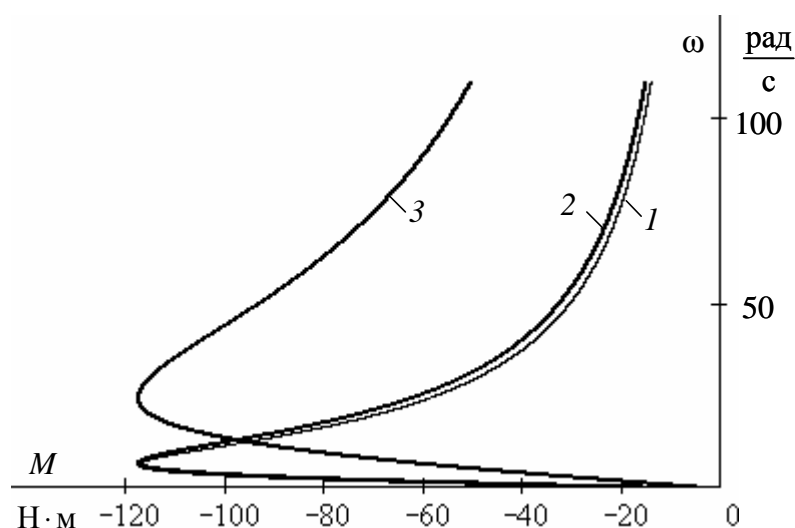


Рис. 8.12. Механические характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения

Анализ механической характеристики 1 режима динамического торможения асинхронного двигателя (см. рис. 8.12) показывает, что процесс торможения двигателя в диапазоне скоростей от рабочей скорости  $\omega_{д2}$  до скорости  $\approx 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  протекает с незначительным тормозным моментом. Очевидно, что процесс торможения будет более эффективным (быстрым) в том случае, когда тормозной момент будет большим (например, равным максимальному моменту динамического торможения  $M_{кдт}$ ). Увеличить момент динамического торможения на высоких скоростях можно, введя в цепь обмотки ротора добавочное сопротивление  $R'_{2доб}$ . Рассчитаем механические характеристики режима динамического торможения при добавочных сопротивлениях цепи обмотки ротора  $R'_{2доб1}$  и  $R'_{2п1} = R'_{2доб1} + R'_{2доб4} + R'_{2доб3}$ . Графики механических характеристик для этих случаев приведены на рис. 8.12 (кривые 2 и 3).

Хотя момент механической характеристики динамического торможения 3 (см. рис. 8.12) при всех скоростях больше и, следовательно, процесс торможения будет протекать значительно быстрее, в дальнейших расчетах остановимся на характеристике 2, т. к. в этом случае принципиальная электрическая схема электропривода будет значительно проще.

Механические характеристики полного цикла работы электропривода представлены на рис. 8.13.

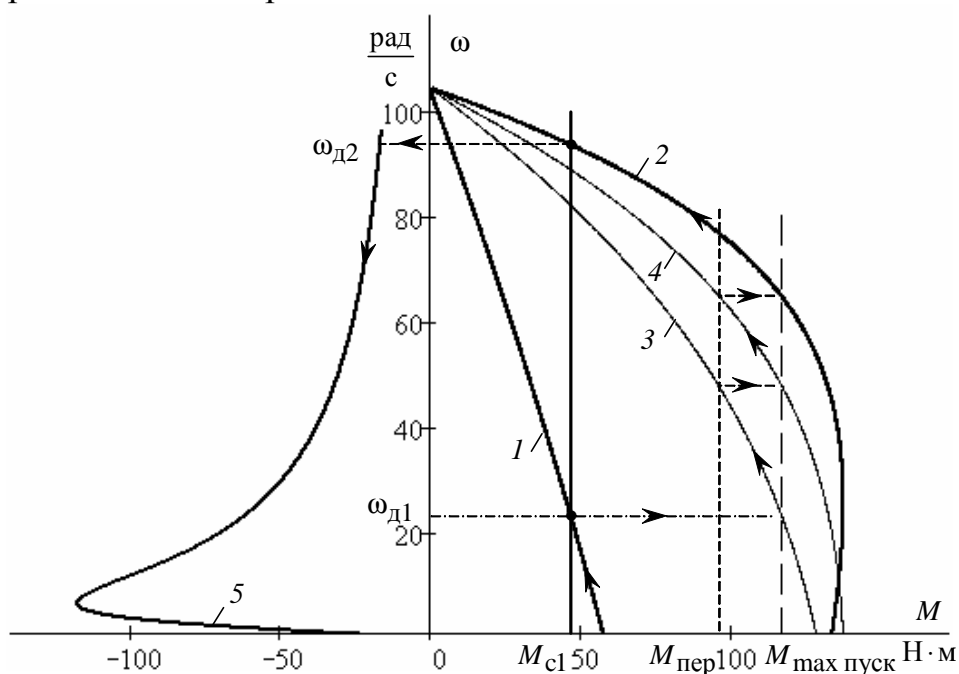


Рис. 8.13. Механические характеристики полного цикла работы электропривода

Электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$  для двигательного цикла работы электропривода рассчитаем по выражению:

$$I_{2i}' = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_{2\text{доб}}'}{s}\right)^2 + x_{\text{кн}}^2}},$$

подставляя в него:  $R_{2\text{доб}}' = R_{2\text{д1}}' = R_{2\text{доб1}}' + R_{2\text{доб4}}' + R_{2\text{доб3}}' + R_{2\text{доб2}}' = 18,53 \text{ Ом}$  – для первой технологической характеристики;

$R_{2\text{доб}}' = R_{2\text{п1}}' = R_{2\text{доб1}}' + R_{2\text{доб4}}' + R_{2\text{доб3}}' = 3,8 \text{ Ом}$  – для первой пусковой характеристики;

$R_{2\text{доб}}' = R_{2\text{п2}}' = R_{2\text{доб1}}' + R_{2\text{доб4}}' = 2,1 \text{ Ом}$  – для второй пусковой характеристики;

$R_{2\text{доб}}' = R_{2\text{д2}}' = R_{2\text{доб1}}' = 0,926 \text{ Ом}$  – для второй технологической характеристики.

Технологические и пусковые электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$  асинхронного двигателя МТМ211-6, рассчитанные в математической системе MathCAD, приведены на рис. 8.14.

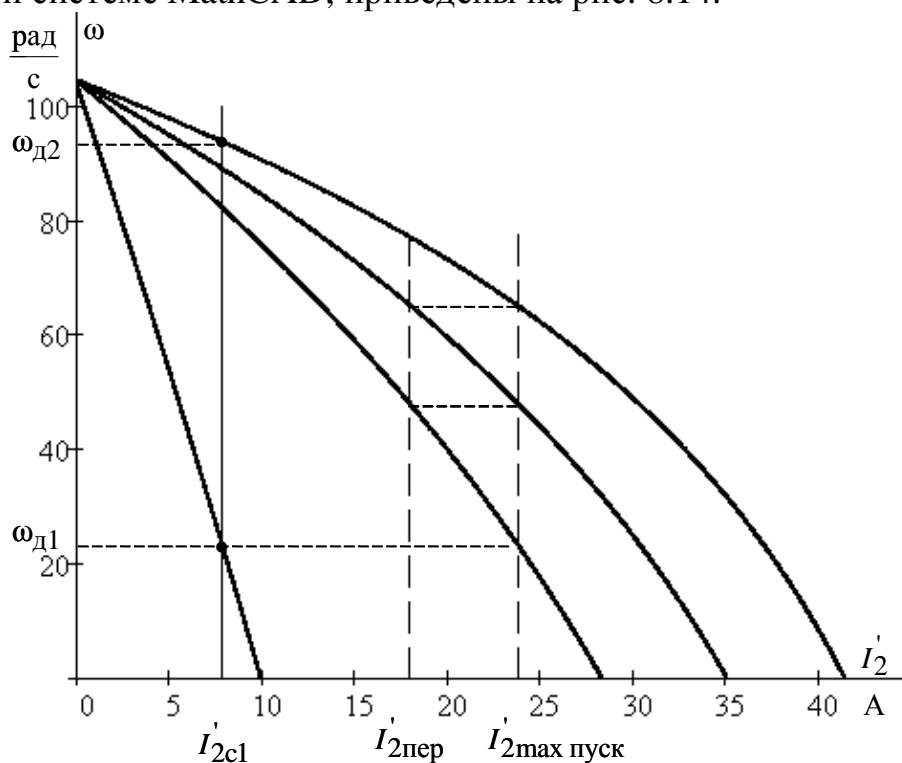


Рис. 8.14. Технологические и пусковые электромеханические характеристики  $I_2' = f(\omega)$  асинхронного двигателя

Электромеханические характеристики  $I_1 = f(s)$  для двигательного цикла работы электропривода рассчитаем по выражению:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin\varphi_2} = \sqrt{9,7^2 + I_2'^2 + 2 \cdot 9,7 \cdot I_2' \cdot \sin\varphi_2},$$

где  $\sin\varphi_2 = \frac{x_{кн}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2' + R_{2доб}'}{s}\right)^2 + x_{кн}^2}} = \frac{3,33}{\sqrt{\left(1,41 + \frac{1,797 + R_{2доб}'}{s}\right)^2 + 3,33^2}}$ .

Расчет произведем с учетом тока  $I_2'$  и добавочных сопротивлений  $R_{2доб}'$ , найденных ранее.

Электромеханические характеристики  $I_1 = f(\omega)$  двигательного цикла работы электропривода приведены на рис. 8.15.

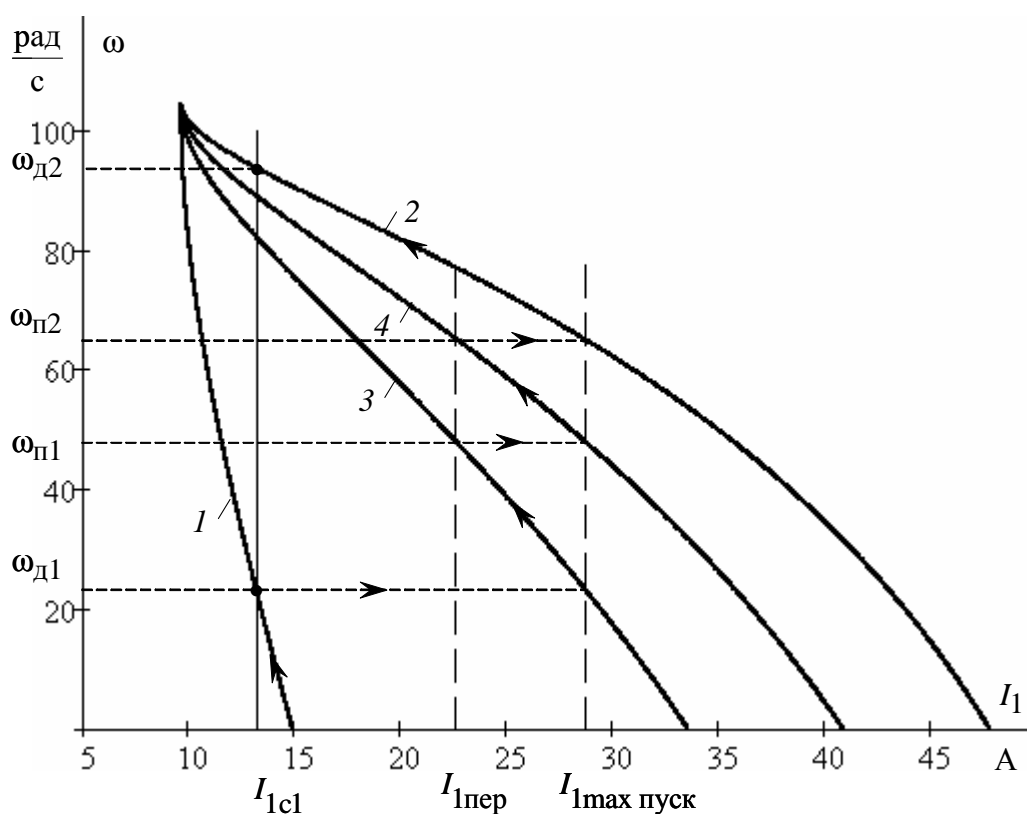


Рис. 8.15. Электромеханические характеристики  $I_1 = f(s)$  электропривода, рассчитанные в математической системе MathCAD: 1 – первая технологическая электромеханическая характеристика; 2 – вторая технологическая электромеханическая характеристика; 3 – первая пусковая характеристика электропривода; 4 – вторая пусковая характеристика электропривода



Электромеханическая характеристика режима динамического торможения определяется эквивалентным переменным током статора:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{\text{кдт}} (X_{\text{мн}} + X'_{2\sigma\text{н}})}{3 \cdot X_{\text{мн}}^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 117,27 (20,0 + 2,044)}{3 \cdot 20,0^2}} = 21,239 \text{ А.}$$

### 8.6. Расчет переходных процессов скорости, момента и тока за цикл работы электропривода

Найдем суммарный момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = k \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{м}} \cdot \frac{1}{i_{\text{ст.р}}^2} = 1,1 \cdot 0,115 + \frac{22}{11,6^2} = 0,29,$$

где  $k = (1,05 \div 1,3)$  – коэффициент, учитывающий момент инерции редуктора;

$J_{\text{дв}}$  – момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>;

$J_{\text{м}}$  – момент инерции производственного механизма, кг·м<sup>2</sup>;

$i_{\text{ст.р}}$  – стандартное передаточное отношение редуктора.

• *Первая технологическая характеристика* (см. характеристики  $I$  на рис. 8.13 и рис. 8.15)

Так как механические и электромеханические характеристики пуска двигателя на первую технологическую скорость линейны, то расчет переходных процессов произведем аналитически.

Расчет электромеханической постоянной времени  $T_{\text{м1}}$  для пуска двигателя по первой технологической характеристике произведем в соответствии с выражением:

$$T_{\text{м1}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \Delta\omega_1}{\Delta M_1} = \frac{J_{\Sigma} \cdot (\omega_{\text{д1}} - 0)}{(M_{\text{п1}} - M_{\text{с1}})} = \frac{0,29 \cdot (23,442 - 0)}{(57,855 - 46,992)} = 0,626 \text{ с,}$$

где  $\Delta\omega_1$ ,  $\Delta M_1$  – соответствующие друг другу приращения скорости и момента на первой технологической характеристике (см. рис. 8.13);

$M_{\text{п1}}$  – пусковой момент первой механической технологической характеристики.

Время переходного процесса пуска двигателя на первую технологическую характеристику  $t = 3 \cdot T_{\text{м1}}$ .

Уравнение для расчета переходного процесса скорости при пуске по первой технологической характеристике:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{нач} - \omega_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M1}}},$$

где  $\omega_{уст}$  – установившаяся угловая скорость двигателя;

$$\omega_{уст} = \omega_{д1} = 23,442 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{нач} - \text{начальное значение угловой скорости; } \omega_{нач} = 0 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$\omega = 23,442 + (0 - 23,442) \cdot e^{0,626 \frac{-t}{T_{M1}}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса момента двигателя:

$$M = M_{уст} + (M_{нач} - M_{уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M1}}},$$

где  $M_{уст}$  – установившееся значение момента двигателя;

$$M_{уст} = M_{с1} = 46,992 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$M_{нач}$  – начальное значение момента двигателя;

$$M_{нач} = M_{п1} = 57,855 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

После подстановки численных значений параметров:

$$M = 46,992 + (57,855 - 46,992) \cdot e^{0,626 \frac{-t}{T_{M1}}}.$$

Уравнение для расчета переходного процесса тока статора:

$$I_1 = I_{1уст} + (I_{1нач} - I_{1уст}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{M1}}},$$

где  $I_{1нач}$  – начальное значение тока статора;  $I_{1нач} = I_{1кз} = 14,948 \text{ А};$

$I_{1уст}$  – установившееся значение тока двигателя;

$$I_{1уст} = I_{1с} = 13,23 \text{ А}.$$

Все значения начальных и установившихся значений параметров взяты из графиков статических характеристик электропривода, рассчитанных в математической системе MathCAD (см. рис. 8.13 и рис. 8.15), используя трассировку.

После подстановки численных значений параметров получим:

$$I = 13,23 + (14,948 - 13,23) \cdot e^{0,626 \frac{-t}{T_{M1}}}.$$

Расчет переходных процессов удобно произвести в математической системе MathCAD, а численные значения параметров снять с помощью трассировщика.

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$  приведены на рис. 8.16.

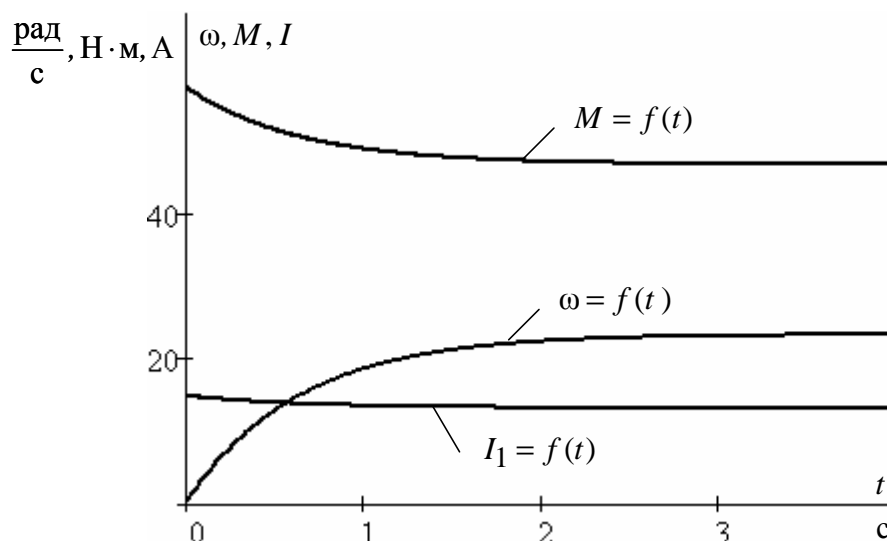


Рис. 8.16. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$

Расчетные значения скорости, момента и тока в переходных режимах сведем в табл. 8.6.

Таблица 8.6

$t, c$	0	0,25	0,5	1	2	3
$\omega, \frac{\text{рад}}{c}$	0	7,718	12,895	18,697	22,482	23,248
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	57,855	54,278	51,879	49,191	47,437	47,082
$I, \text{А}$	14,948	14,376	13,999	13,576	13,3	13,244

Как следует из анализа графиков, переходные процессы скорости, момента и тока можно считать законченными через  $t = 3 \cdot T_{M1} = 3 \cdot 0,626 = 1,88$  с (теоретическое время вхождения в 5%-ю зону).

Время работы на первой технологической характеристике  $t_1 = 20$  с.

• *Первая пусковая характеристика* (см. характеристики 3 на рис. 8.13 и рис. 8.15)

Динамический момент, соответствующий первой пусковой характеристике, находится из уравнения движения электропривода:

$$M_{\text{дин}} = M - M_{c1} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

Первая пусковая механическая характеристика и соответствующая ей зависимость динамического момента от скорости приведены на рис. 8.17.

Так как переходный процесс протекает на нелинейном участке механической характеристики асинхронного двигателя, то его определяют методом пропорций [12]. Сущность этого метода заключается в замене бесконечно малых приращений скорости  $d\omega$  и времени  $dt$  в уравнении движения электропривода малыми конечными приращениями –  $\Delta\omega$  и  $\Delta t$ .

Построения для расчета переходных процессов методом конечных приращений будем производить в следующей последовательности:

– для рассчитанных механической характеристики электродвигателя  $M = f(\omega)$  (см. характеристику 3 на рис. 8.13) и производственного механизма  $M_{c1} = 46,992$  находится динамический момент электропривода  $M_{\text{дин}}(\omega) = M(\omega) - M_{c1}(\omega)$ ;

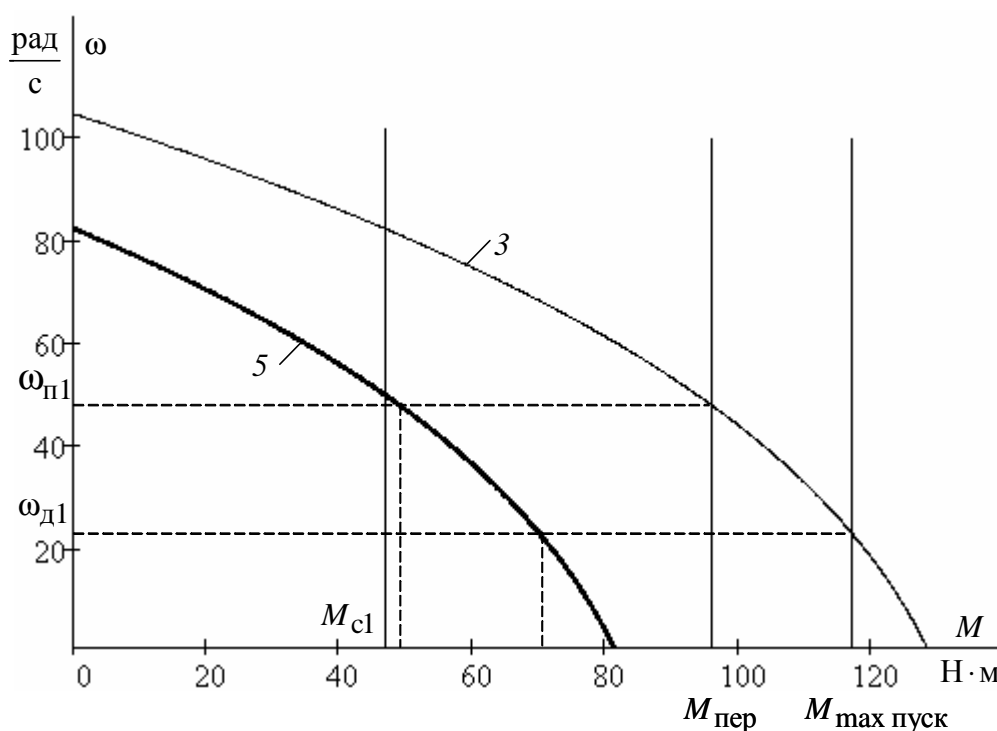


Рис. 8.13. Механические характеристики электропривода:  
3 – первая пусковая механическая характеристика электропривода;  
5 – динамический момент электропривода от скорости

– кривую динамического момента  $M_{\text{дин}}(\omega)$  заменяют ступенчатой с участками:

$$M_{\text{дин.ср.}i} = \frac{M_{\text{дин.маx}i} + M_{\text{дин.мин}i}}{2},$$

где  $M_{\text{дин.маx}i}$ ,  $M_{\text{дин.мин}i}$  – максимальное и минимальное значения динамического момента на  $i$ -м участке;

– определяют время переходного процесса, которое требуется для достижения скорости  $\omega_i = \omega_{\text{нач}i} + \Delta\omega_i$  на каждом участке:

$$\Delta t_i = J_{\Sigma} \cdot \frac{\Delta\omega_i}{M_{\text{дин.ср.}i}}, \text{ с,}$$

где  $\Delta\omega_i$  – приращение скорости на  $i$ -м участке. Полученные на отдельных участках элементарные промежутки времени суммируются для определения полного времени переходного процесса:

$$t = \sum_{i=1}^{i=m} \Delta t_i, \text{ с,}$$

где  $m$  – число участков разбиения механической характеристики;

– по графику электромеханической характеристики  $I_1 = f(\omega)$  определяют значения тока  $I_{1i}$ , соответствующие конечной угловой скорости  $\omega_i$  каждого участка.

Все необходимые вычисления удобно произвести по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представить в виде табл. 8.7.

Таблица 8.7

Уча- сток	Конеч- ная ско- рость на участке	Прира- щение скорости на участ- ке	Среднее значе- ние, $M_{\text{дин}i}$	Время п.п. на рассмат- ривае- мом уча- стке $\Delta t_i$	Время с начала п.п., $t_i$	Конеч- ное зна- чение $M_{\text{дв}}$ на участке	Конеч- ное зна- чение то- ка $I_1$ на участке
1	23,52	0	70,05	0	0	117,27	28,69
1–2	28,45	5	68,31	0,0212	0,0211	112,86	27,54
2–3	33,45	5	64,64	0,0221	0,0436	109,69	26,34
3–4	38,45	5	60,61	0,0239	0,0675	105,51	25,12
4–5	43,45	5	56,17	0,0258	0,0933	100,81	23,84
5–6	48,16	4,712	51,41	0,0266	0,1120	95,98	22,61

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$ , построенные по точкам в математической системе Excel, приведены на рис. 8.18.

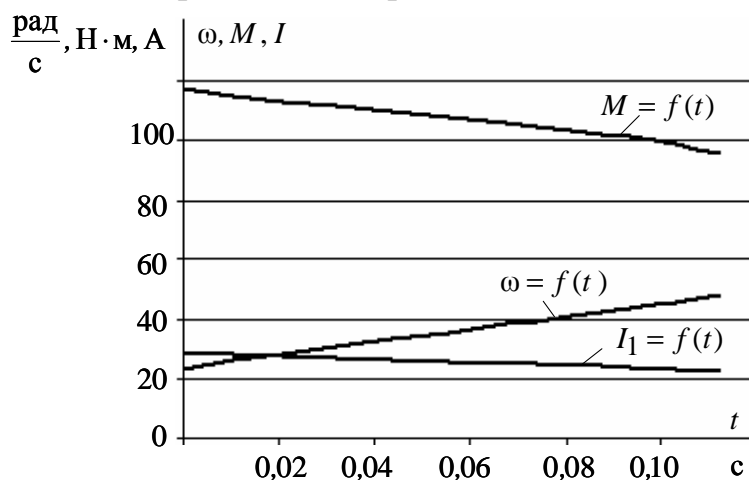


Рис. 8.18. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$

- *Вторая пусковая характеристика* (см. характеристики 4 на рис. 8.13 и рис. 8.15)

Вторая пусковая механическая характеристика и соответствующая ей зависимость динамического момента от скорости приведены на рис. 8.19.

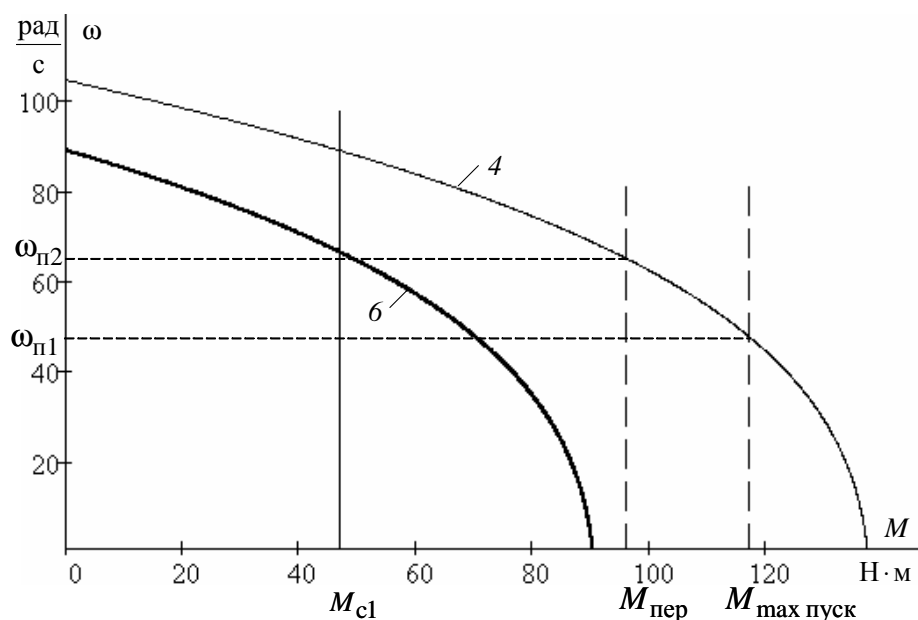


Рис. 8.19. Механические характеристики электропривода:  
4 – вторая пусковая механическая характеристика электропривода;  
б – динамический момент электропривода от скорости

Переходный процесс по второй пусковой характеристике протекает между скоростями переключения  $\omega_{п1} = 48,162 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  и  $\omega_{п2} = 65,333 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Все необходимые вычисления проведены по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представлены в виде табл. 8.8.

Таблица 8.8

Уча- сток	Конеч- ная ско- рость на участке	Прира- щение скорости на участ- ке	Среднее значе- ние, $M_{дин i}$	Время п.п. на рассмат- ривае- мом уча- стке $\Delta t_i$	Время с начала п.п., $t_i$	Конеч- ное зна- чение $M_{дв}$ на участке	Конеч- ное значе- ние то- ка $I_1$ на участке
1	48,162	0	70,02	0	0	117,17	28,69
1-2	51,162	3	68,57	0,0127	0,0127	114,01	27,68
2-3	54,162	3	65,49	0,0133	0,026	110,84	26,68
3-4	57,162	3	62,04	0,0140	0,040	107,25	25,61
4-5	60,162	3	58,31	0,0149	0,0549	103,35	24,52
5-6	65,333	5,171	52,68	0,0165	0,0714	96,32	22,61

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$ , построенные по точкам в математической системе Excel, приведены на рис. 8.20.

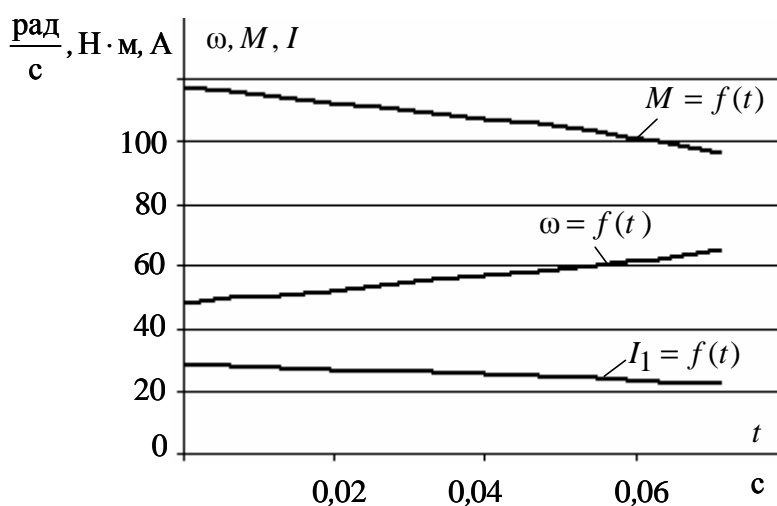


Рис. 8.20. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$  пуска двигателя по второй пусковой характеристике

Во избежание ошибок контролируйте начальные и конечные значения переменных тока  $I$  и скорости  $\omega$  по статическим электромеханическим характеристикам и по графикам переходных процессов. В точках контроля должно быть их соответствие.

- Вторая технологическая характеристика (см. характеристики 2 на рис. 8.13 и рис. 8.15)

Вторая технологическая механическая характеристика и соответствующая ей зависимость динамического момента от скорости приведены на рис. 8.21.

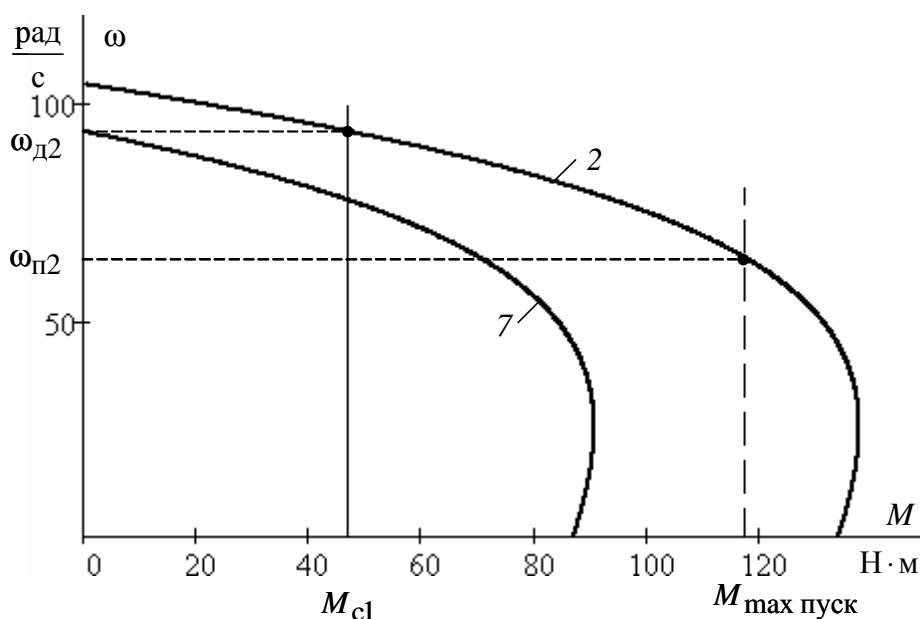


Рис. 8.21. Механические характеристики электропривода:  
 2 – вторая технологическая механическая характеристика электропривода;  
 7 – зависимость динамического момента электропривода от скорости

Переходный процесс по второй технологической характеристике протекает между скоростью переключения  $\omega_{п2} = 65,333 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  и второй технологической скоростью электропривода  $\omega_{д2} = 93,778 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Все необходимые вычисления проведены по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представлены в виде табл. 8.9.



Таблица 8.9

Уча- сток	Конеч- ная ско- рость на участке	Прира- щение скорости на участ- ке	Среднее значе- ние, $M_{дин i}$	Время п.п. на рассмат- ривае- мом участ- ке $\Delta t_i$	Время с начала п.п., $t_i$	Конеч- ное значе- ние $M_{дв}$ на участке	Конеч- ное значе- ние то- ка $I_1$ на участке
1	65,333	0	69,833	0	0	117,17	28,619
1-2	70,333	5	66,02	0,0220	0,022	109,2	26,187
2-3	75,333	5	57,524	0,0250	0,047	99,83	23,584
3-4	80,333	5	47,296	0,0307	0,078	88,74	20,885
4-5	85,333	5	35,000	0,0414	0,119	75,251	18,016
5-6	90,333	5	20,330	0,0713	0,190	59,38	15,128
6-7	93,778	3,445	6,200	0,2340	0,424	46,987	13,230

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$ , построенные по точкам табл. 8.9 в математической системе Excel, приведены на рис. 8.22.

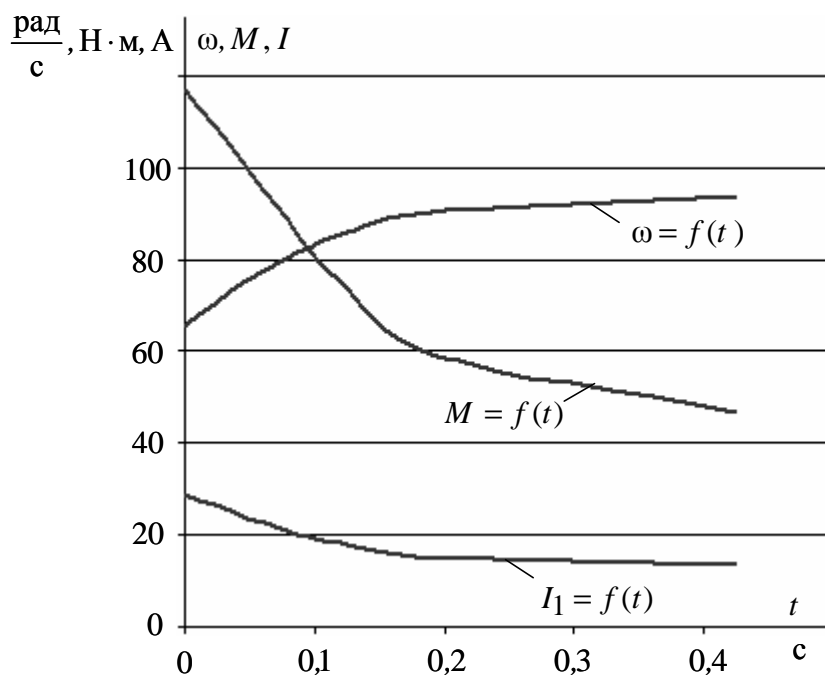


Рис. 8.22. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$  пуска двигателя по второй пусковой характеристике

- *Характеристика динамического торможения* (см. характеристику 5 на рис. 8.13)

Определение начальных условий для процесса динамического торможения при реактивном характере нагрузки поясняет механические характеристики электропривода, приведенные на рис. 8.23.

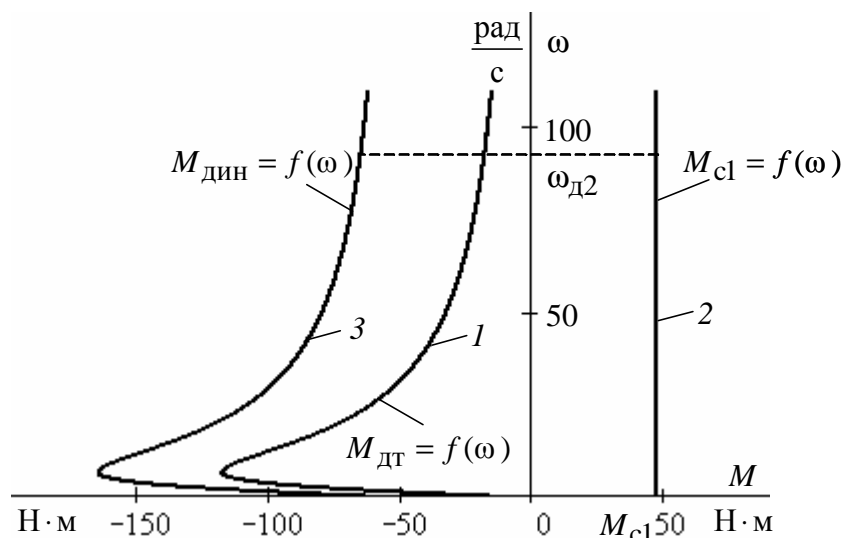


Рис. 8.23. Механические характеристики:  
 1 – двигателя в режиме динамического торможения;  
 2 – механизма, приведенная к валу двигателя; 3 – электропривода динамическая режима динамического торможения

Как следует из уравнения движения электропривода:

$$-M_{дт} - M_{с1} = M_{дин},$$

и момент, развиваемый электрической машиной,  $-M_{дт}$ , и момент механизма  $-M_{с1}$ , приведенный к валу двигателя, являются тормозными, поэтому складываются.

Переходный процесс по характеристике динамического торможения протекает от второй технологической скорости электропривода  $\omega_{д2} = 93,778 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  до полной его остановки  $\omega = 0$ .

Эквивалентный переменный ток статора на участке динамического торможения:

$$I_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \omega_0 \cdot M_{кдт} (X_{тн} + X'_{2сн})}{3 \cdot X_{тн}^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 104,7 \cdot 117,27 (20,0 + 2,044)}{3 \cdot 20,0^2}} = 21,239 \text{ А.}$$

Все необходимые вычисления проведены по результатам расчета статических характеристик в математической системе MathCAD и представлены в виде табл. 8.10.

Таблица 8.10

Участок	Конечная скорость на участке	Приращение скорости на участке	Среднее значение, $M_{дин i}$	Время п.п. на рассматриваемом участке $\Delta t_i$	Время с начала п.п., $t_i$	Конечное значение $M_{дв}$ на участке	Конечное значение тока $I_1$ на участке
1	93,78	0	-64,59	0	0	-17,60	21,293
1-2	83,78	10	-65,63	0,044	0,044	-19,673	21,293
2-3	73,78	10	-67,97	0,043	0,087	-22,294	21,293
3-4	63,78	10	-70,98	0,041	0,128	-25,71	21,293
4-5	53,78	10	-75,01	0,039	0,167	-30,341	21,293
5-6	43,78	10	-80,63	0,036	0,203	-36,951	21,293
6-7	33,78	10	-88,99	0,033	0,236	-47,075	21,293
7-8	23,78	10	-102,59	0,028	0,264	-64,128	21,293
8-9	18,78	5	-117,75	0,012	0,276	-77,399	21,293
9-10	15,78	5	-129,48	0,011	0,287	-87,578	21,293
10-11	10,78	5	-144,58	0,010	0,297	-107,6	21,293
11-12	5,78	5	-158,24	0,009	0,306	-114,9	21,293
12-13	2,78	3	-144,35	0,006	0,312	-79,81	21,293
13-14	0	2,78	-63,40	0,0127	0,325	0	21,293

Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$ , построенные по точкам табл. 8.10 в математической системе Excel, приведены на рис. 8.24.

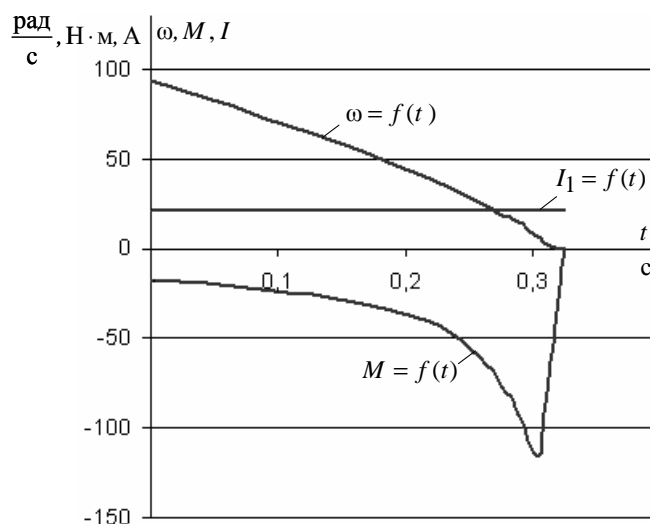


Рис. 8.24. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$  двигателя в режиме динамического торможения

По данным таблиц 8.6–8.10 построим графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$  для полного цикла работы электропривода (рис. 8.25).

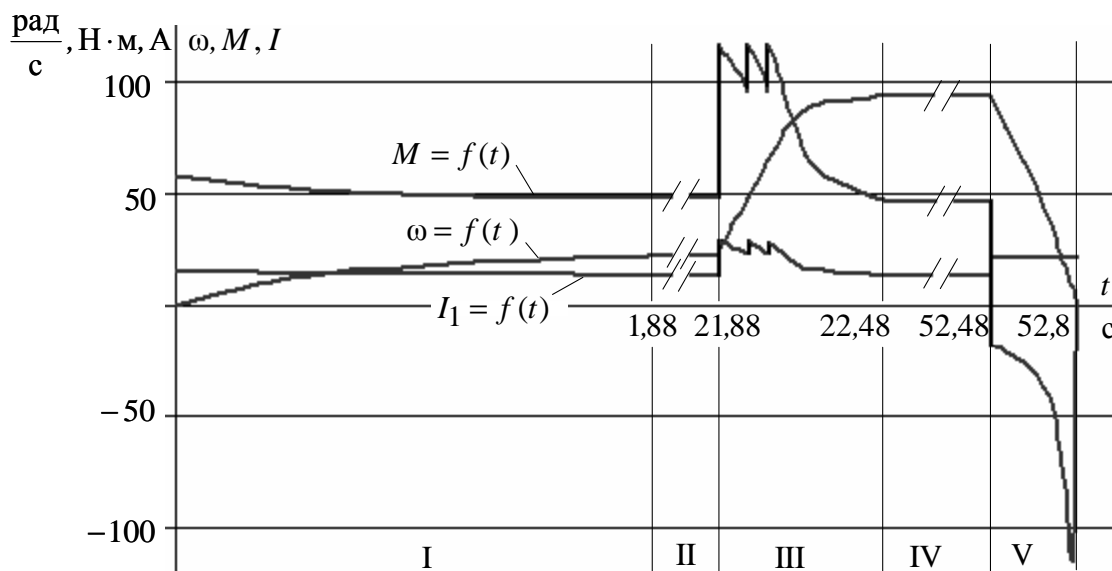


Рис. 8.25. Графики переходных процессов скорости  $\omega = f(t)$ , момента  $M = f(t)$  и тока статора  $I_1 = f(t)$  для полного цикла работы электропривода: I – пуск двигателя на первую скорость; II – работа на первой скорости; III – переход в две ступени на вторую скорость; IV – работа на второй скорости; V – динамическое торможение

Как следует из анализа рис. 8.25, время включенного состояния электропривода с учетом переходных режимов увеличилось и составляет  $t_p = 52,8$  с.

### 8.7. Проверка двигателя по нагреву и перегрузке

Потери энергии в двигателе вызывают нагрев его отдельных частей. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Чем больше нагревостойкость, тем при той же мощности меньше размеры двигателя или при тех же размерах можно увеличить его мощность.

Проверка двигателя постоянного тока по нагреву производится на основе рассчитанных графиков переходных процессов тока для полного цикла работы электропривода и его режима работы.

Обычно применяются методы среднеквадратичного (эквивалентного) тока.

В общем виде эквивалентный ток двигателя за рабочий цикл можно вычислить по следующему уравнению:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\int_0^{\sum t_p + \sum t_{\text{пп}}} I^2(t) \cdot dt}{\sum t_i \cdot \beta_i}}, \quad (4.92)$$

где  $I_{\text{э}}$  – искомое значение эквивалентной величины тока, А;

$\sum t_p$  – суммарное время работы за цикл, с;

$\sum t_{\text{пп}}$  – суммарное время переходных процессов за цикл, с;

$t_i$  – время работы на  $i$ -ом участке, с;

$\beta_i$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -ом участке.

При повторно-кратковременном режиме работы суммарное время состоит только из рабочего времени. Разбив переходный процесс на отдельные участки времени и определив на этих участках средний ток, найдем эквивалентный ток двигателя на интервале времени работы:

$$\begin{aligned} I_{1\text{э}} &= \sqrt{\frac{14,38^2 \cdot 0,25 + 14,19^2 \cdot 0,25 + 13,79^2 \cdot 0,5 + 13,5^2 \cdot 0,88 + 13,23^2 \cdot 20 +}{0,25 \cdot 0,54 + 0,25 \cdot 0,55 + 0,5 \cdot 0,58 + 0,88 \cdot 0,6 + 20 \cdot 0,62 +}} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{28,1^2 \cdot 0,02 + 26,9^2 \cdot 0,022 + 25,7^2 \cdot 0,024 + 24,5^2 \cdot 0,026 + 23,2^2 \cdot 0,027}{0,02 \cdot 0,64 + 0,022 \cdot 0,66 + 0,024 \cdot 0,69 + 0,026 \cdot 0,71 + 0,027 \cdot 0,74 +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ 27,68^2 \cdot 0,026 + 24,52^2 \cdot 0,029 + 26,19^2 \cdot 0,047 + 18^2 \cdot 0,143 +}{+ 0,026 \cdot 0,77 + 0,045 \cdot 0,81 + 0,047 \cdot 0,87 + 0,143 \cdot 0,94 +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{14,18^2 \cdot 0,23 + 13,23^2 \cdot 30 + 21,29^2 \cdot 0,325}{0,23 \cdot 0,98 + 30 \cdot 0,99 + 0,325 \cdot 0,75} = 14,69 \text{ А.} \end{aligned}$$

При повторно-кратковременном режиме работы эквивалентные величины пересчитываются на каталожные значения продолжительности включения и длительности работы.

Определим относительную продолжительность включения, с учетом переходных режимов и торможения:

$$\text{ПВ}_{\text{э}} = \frac{t_{\text{пп1}} + t_{\text{р1}} + t_{\text{пп2}} + t_{\text{пп3}} + t_{\text{пп4}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{т}}}{t_{\text{пп1}} + t_{\text{р1}} + t_{\text{пп2}} + t_{\text{пп3}} + t_{\text{пп4}} + t_{\text{р2}} + t_{\text{т}} + t_0} 100 \text{ \%}.$$

При подстановке численных значений параметров получим:

$$\text{ПВ}_{\text{э}} = \frac{1,88 + 20 + 0,12 + 0,0714 + 0,424 + 30 + 0,325}{1,88 + 20 + 0,12 + 0,0714 + 0,424 + 30 + 0,325 + 100} 100 \text{ \%} = 32,4 \text{ \%}.$$

Пересчитаем эквивалентное значение тока на стандартное значение:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{э}}}{\text{ПВ}_{\text{к}}}} = 14,69 \sqrt{\frac{32,4}{40}} = 13,22 \text{ А.}$$

Пересчитанная величина тока  $I_{\text{к}}$  сопоставляется с номинальной величиной тока  $I_{1\text{н}}$  выбранного двигателя. При этом должно выполняться условие:

$$I_{\text{к}} \leq I_{1\text{н}},$$

где  $I_{\text{к}}$  – пересчитанная на каталожную эквивалентная величина тока, А;  
 $I_{1\text{н}}$  – номинальное значение тока статора асинхронного двигателя;  
 $I_{1\text{н}} = 13,6 \text{ А}$ ;

$$13,22 \text{ А} < 13,6 \text{ А}.$$

Условие проверки двигателя на нагрев выполняется, – значит, двигатель выбран правильно.

Условие перегрузки учитывалось при построении пусковых механических характеристик.

## 8.8. Схема управления электроприводом

Схема силовых цепей электропривода приведена на рис. 8.26. Питание асинхронного двигателя осуществляется от трехфазной сети переменного тока через рубильник  $QF1$ , предохранители  $FU1$ , реле максимального тока  $KA1...KA3$ . Пуск асинхронного двигателя и регулирование его скорости осуществляются с помощью силовых контактов цепи обмотки статора  $KM$ ; в роторную цепь двигателя  $M$  включены два регулировочных резистора –  $R_{2\text{ддо1}}$ ,  $R_{2\text{ддоб}}$  и два пусковых резистора –  $R_{2\text{ддоб}}$ ,  $R_{2\text{ддоб}}$ , которые шунтируются силовыми контактами схемы: регулировочным  $KM3$  и ускорения  $KM1$ ,  $KM2$ . Динамическое торможение схемы осуществляется постоянным напряжением, поданным на две обмотки статора двигателя через силовые контакты динамического торможения  $KM4$  и токоограничивающий резистор цепи статора  $R_{\text{т}}$ .

Релейно-контакторная схема управления электроприводом приведена на рис. 8.27. Так как электропривод работает в интенсивном режиме с частыми пусками и торможениями двигателя, то схема управления электроприводом выполнена на постоянном токе. Выпрямитель  $VD1...VD4$  однофазный, подключен к сети переменного тока через автомат  $QF2$ , предохранители  $FU2$  и реле максимального тока  $KA4$ .

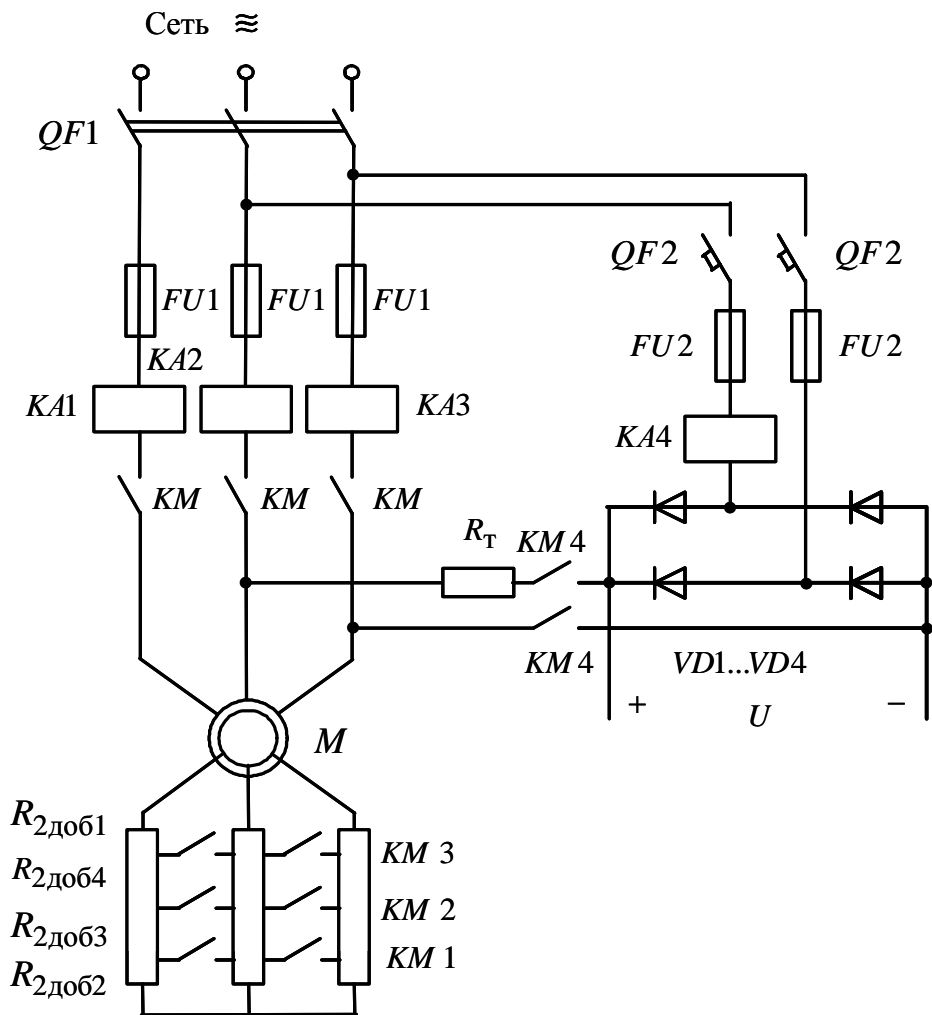


Рис. 8.26. Схема силовых цепей асинхронного электропривода

Электропривод работает следующим образом. Перед пуском электропривода включают автоматы  $QF1$  и  $QF2$ . На схему силовых цепей подается напряжение переменного тока, а на схему управления – напряжение постоянного тока  $U$ . Подача напряжения на схему управления приводит к включению реле времени  $KT1$ , которое размыкает свои контакты в цепях контакторов  $KM1$  и  $KM3$ . Схема подготовлена к включению.

Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки  $SB1$ . Если реле максимального тока  $KA1$ ,  $KA2$ ,  $KA3$ ,  $KA4$  и реле времени  $KT4$  находятся в выключенном состоянии, то срабатывает контактор  $KM$ , подключая обмотку статора асинхронного двигателя  $M$  к сети переменного напряжения, и он начинает разгоняться по первой технологической характеристике с полностью введенными сопротивлениями в цепи обмот-

ки ротора. Кроме того, замыкаются вспомогательные замыкающие контакты  $KM$  в цепи реле времени  $KT2$ ,  $KT3$ ,  $KT4$  и в цепи реле времени  $KT5$  и размыкаются размыкающие контакты  $KM$  в цепи контакторов  $KM3$ ,  $KM4$  и реле времени  $KT1$ . Реле времени  $KT1$ , потеряв питание вследствие размыкания контакта  $KM$ , начинает отсчет выдержки времени разгона по первой технологической характеристике до скорости  $\omega_{д1}$  (см. рис. 8.13), и время работы на ней составляет 20 с (см. рис. 8.25).

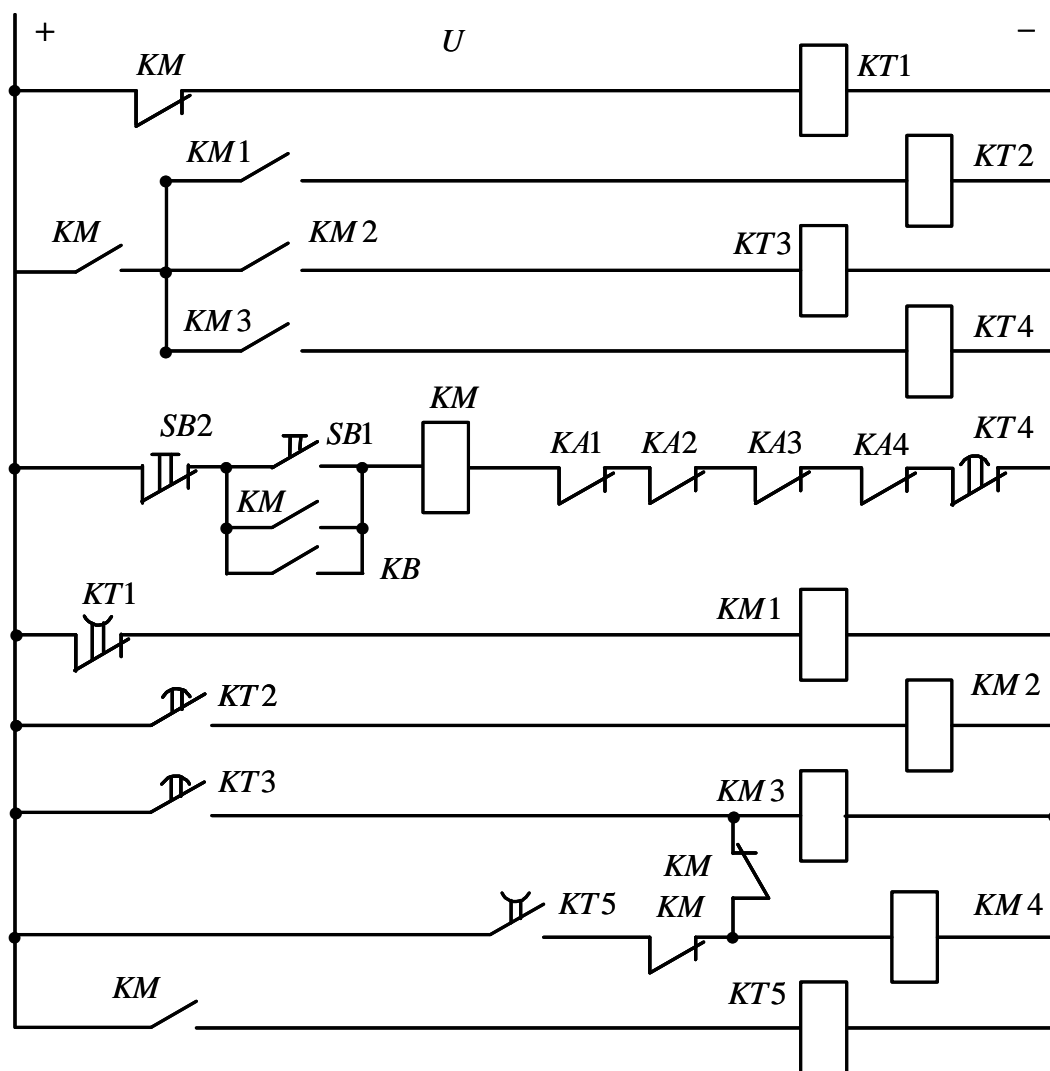


Рис. 8.27. Схема управления электропривода

Через 21,88 с размыкающий контакт  $KT1$  замкнется и включится контактор  $KM1$ . Контактор  $KM1$ , включившись, закорачивает резисторы  $R_{2до2}$  в цепи обмотки ротора двигателя и одновременно своим замыкающим контактом подает напряжение питания на катушку реле времени



*КТ2*. Последнее включается и начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по первой пусковой характеристике 3 (см. рис. 8.13).

По истечении времени (0,112 с) замыкающий контакт реле времени *КТ2* замыкается. Получает питание контактор *КМ2*; он, включившись, своим замыкающим контактом *КМ2* шунтирует первые пусковые резисторы  $R_{2ддо3}$ . Двигатель переходит на вторую пусковую характеристику – 4 (см. рис. 8.13). Получает питание реле времени *КТ3*, и своим замыкающим контактом *КТ3* начинает отсчет выдержки времени разгона двигателя по второй пусковой характеристике. По истечении этой выдержки времени (0,0714 с) контакт *КТ3* замыкается. Получает питание обмотка контактора *КМ3*, замыкается контакт *КМ3* в роторной цепи асинхронного двигателя, шунтирующий резисторы  $R_{2ддо4}$ , двигатель переходит на вторую технологическую характеристику – 2 и разгоняется по ней до установившейся скорости  $\omega_{д2}$ , определяемой нагрузкой  $M_{с1}$ .

Кроме того, замыкается контакт *КМ3* в цепях схемы управления электроприводом, включается реле времени *КТ4*, и оно начинает отсчет выдержки времени пуска и работы электропривода на второй технологической характеристике – 30,424 с.

По истечении этого времени реле времени *КТ4* размыкает свой размыкающий контакт в цепи силового контактора *КМ*. Силовой контактор *КМ* теряет питание и отключает обмотку статора двигателя *М* от трехфазной сети переменного напряжения, а в цепях схемы управления выключает все реле времени и, как следствие, все силовые контакторы.

Начинается процесс динамического торможения двигателя. Реле времени *КТ5*, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени динамического торможения, а размыкающие контакты *КМ* включают контакторы *КМ3* и *КМ4*. Контактор *КМ3*, вновь включившись, оставляет в цепи обмотки ротора двигателя сопротивления  $R_{2ддо1}$ , а контакторы *КМ4* подключают обмотку статора двигателя к источнику постоянного напряжения. По истечении выдержки времени (0,325 с) замыкающий контакт реле времени *КТ5* разомкнется, выключит контактор *КМ4*, и процесс динамического торможения закончится.

Повторное включение двигателя должно произойти через интервал времени паузы  $t_{п} = 110$  с при управлении от внешних устройств замыканием контакта *КВ* или нажатием кнопки *SB1* на пульте управления электроприводом.

## 9. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
2. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
3. Приводы машин: справочник / В.В. Длоугий, Т.И. Муха, А.П. Цупиков, Б.В. Януш; под общ. ред. В.В. Длоугого. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1982. – 383 с.
4. Справочник по электрическим машинам: в 2 т.; под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.: ил.
5. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
6. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л., Энергия, 1971. – 440 с.
7. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 380 с.
8. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 39–42.
9. Автоматизированный электропривод промышленных установок; под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
10. Чернышев А.Ю. Автоматизированный электропривод: методические указания и задания по курсовому проектированию. – Томск: Изд. ТПИ, 1974. – 19 с.
11. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – Л.-М.: Госэнергоиздат, 1963. – 722 с.
12. Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: учебно-метод. пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 120 с.

## ПРИМЕР РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ MATHCAD

Механической характеристикой асинхронного двигателя называется зависимость момента, развиваемого двигателем, в функции от скольжения

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (R_2' + R_{2Di}')}{\omega_0 \cdot s \cdot [(R_1 + (R_2' + R_{2Di}') \cdot s^{-1})^2 + X_{кн}^2]}$$

Однако расчет механических характеристик асинхронного двигателя в данном курсовом проекте удобнее производить в координатах – момент в функции от скорости двигателя. Пример записи программы расчета механических характеристик в математической системе MathCAD будет иметь следующий вид:

$$s := 0,0.001..1$$

$$\omega_0 := 104.7$$

$$\omega_1(s) := \omega_0 \cdot (1 - s)$$

$$M_1(s) := \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1.797 + 18.53)}{104.7 \cdot s \cdot \left[ \left( 1.41 + \frac{1.797 + 18.53}{s} \right)^2 + (1.29 + 2.044)^2 \right]}$$

$$M_2(s) := \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1.797 + 0.926)}{104.7 \cdot s \cdot \left[ \left( 1.41 + \frac{1.797 + 0.926}{s} \right)^2 + (1.29 + 2.044)^2 \right]}$$

В математической системе MathCAD механические характеристики могут быть построены в виде графика, как показано на рис. П1.1.

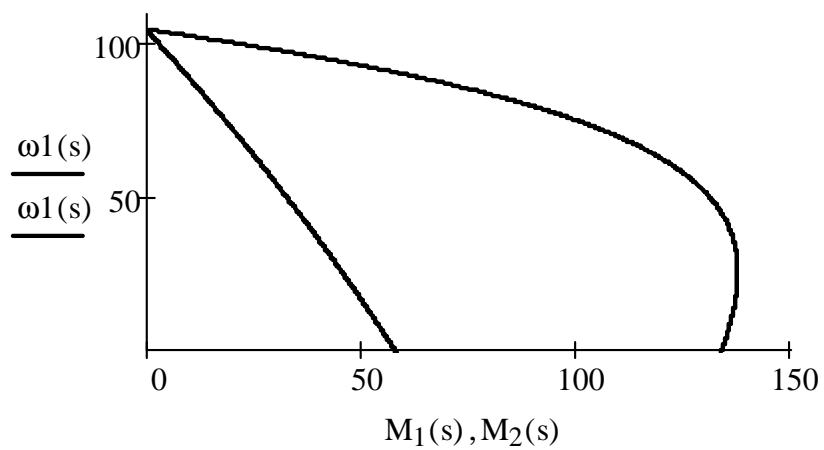


Рис. П1.1. Механические характеристики асинхронного двигателя, рассчитанные в математической системе MathCAD

## Приложение 2

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором  
типа МТ, МТВ, МТН ( $U_{1л} = 380$  В;  $U_{1ф} = 220$  В; 50 Гц; ПВ, % = 25)

Тип	$P_n$ , кВт	$\frac{n_n}{\text{об}} / \text{мин}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	Статор					
				$\cos\varphi$		$I_{1н}$ , А	$I_0$ , А	$R_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом
				ном.	х.х.				
МТ011-6	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93
МТ012-6	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58
МТ111-6	3,5	915	2,3	0,7	0,11	10,5	6,6	2,116	203
МТ112-6	5	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39
МТ211-6	7,5	935	2,5	0,7	0,09	20,8	11,8	0,68	107
МТВ311-6	11	945	2,8	0,73	0,09	28,6	16,7	0,54	0,575
МТВ311-8	7,5	695	2,5	0,71	0,09	21	14	0,88	0,965
МТВ312-6	16	955	2,8	0,77	0,08	37,6	20,6	0,33	0,41
МТВ312-8	11	710	2,8	0,66	0,1	33	22,1	0,53	0,56
МТВ411-6	22	965	2,8	0,71	0,07	55	33,2	0,19	0,31
МТВ411-8	16	715	2,8	0,65	0,08	45,7	30,2	0,285	0,43
МТВ412-6	30	970	2,8	0,73	0,06	70,5	42	0,125	0,23
МТВ412-8	22	720	2,8	0,69	0,07	58,0	37,1	0,207	0,32
МТВ511-8	30	720	2,8	0,68	0,06	77	46	0,123	0,245
МТВ512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17
МТВ611-10	45	575	3	0,7	0,066	115	80	0,087	0,189
МТВ612-10	60	578	3	0,72	0,061	145	93	0,055	0,142
МТВ613-10	80	580	3	0,72	0,056	190	120	0,042	0,107
МТВ711-10	100	584	2,8	0,67	0,053	255	180	0,025	0,096
МТВ712-10	125	587	2,8	0,66	0,045	320	230	0,016	0,08
МТВ713-10	160	587	2,8	0,68	0,04	395	285	0,012	0,061
МТН111-6	3,5	870	1,2	0,72	0,154	11,6	9,87	2,62	1,7
МТН112-6	5,3	885	2	0,76	0,123	15,3	11,8	1,61	1,14
МТН211-6	832	900	2	0,7	0,112	24,6	19	0,835	0,88
МТН311-6	13	925	2,5	0,74	0,095	35	23,2	0,51	0,645
МТН312-6	17,5	945	2,4	0,77	0,092	43	34,4	0,337	0,431
МТН311-8	9	675	2	0,74	0,12	26,1	17,7	0,98	0,843
МТН312-8	13	690	2,5	0,74	0,106	34,7	27,5	0,534	0,529
МТН411-6	27	950	3	0,77	0,08	65	39,7	0,219	0,271
МТН412-6	36	955	3,1	0,75	0,071	87	51,8	0,133	0,197
МТН411-8	18	695	2,5	0,73	0,086	48	29,8	0,352	0,507
МТН412-8	26	710	2,5	0,68	0,084	72	49,6	0,202	0,313
МТН511-8	34	695	2,3	0,77	0,07	82	47,4	0,164	0,232
МТН512-8	45	695	3	0,79	0,08	104	53,1	0,103	0,172
МТН611-10	53	560	3,2	0,76	0,08	128	78,1	0,086	0,18
МТН612-10	70	560	2,6	0,77	0,06	165	88,7	0,06	0,136
МТН613-10	90	570	2,1	0,76	0,06	207	120	0,042	0,102
МТН711-10	125	580	2,3	0,74	0,042	287	155	0,026	0,078
МТН712-10	155	580	2,3	0,75	0,044	355	183	0,02	0,064
МТН713-10	200	582	2,3	0,73	0,042	458	247	0,014	0,048

Окончание прил. 2

Тип	$P_H,$ кВт	$n_H,$ об/ мин	$J_{дв},$ кг·м <sup>2</sup>	Ротор				
				$E_{2H},$ В	$I_{2H},$ А	$R_2,$ Ом	$X_{2\sigma},$ Ом	$k_e,$ о.е.
МТ011-6	1,4	885	0,0212	112	9,3	0,695	0,565	3,14
МТ012-6	2,2	895	0,0288	144	11	0,67	0,585	2,5
МТ111-6	3,5	915	0,0488	181	13,7	0,525	0,755	1,96
МТ112-6	5	925	0,0675	206	16,6	0,5	0,43	1,72
МТ211-6	7,5	935	0,115	255	19,8	0,44	0,88	1,38
МТВ311-6	11	945	0,225	172	42,5	0,11	0,225	2,1
МТВ311-8	7,5	695	0,275	251	20,5	0,47	0,72	1,41
МТВ312-6	16	955	0,313	208	49,5	0,099	0,25	1,75
МТВ312-8	11	710	0,385	182	41	0,13	0,23	1,96
МТВ411-6	22	965	0,5	225	61	0,066	0,23	1,6
МТВ411-8	16	715	0,538	207	49,5	0,103	0,25	1,73
МТВ412-6	30	970	0,675	259	72	0,055	0,225	1,4
МТВ412-8	22	720	0,75	234	59	0,09	0,24	1,53
МТВ511-8	30	720	1,025	280	67,5	0,082	0,28	1,28
МТВ512-8	40	730	1,4	322	76,5	0,072	0,24	1,12
МТВ611-10	45	575	4,25	185	155	0,027	0,046	1,93
МТВ612-10	60	578	5,25	245	153	0,033	0,062	1,44
МТВ613-10	80	580	6,25	320	155	0,038	0,078	1,12
МТВ711-10	100	584	10,25	275	230	0,017	0,066	1,28
МТВ712-10	125	587	12,7	345	225	0,02	0,082	1,01
МТВ713-10	160	587	15	420	235	0,022	0,098	0,84
МТН111-6	3,5	870	0,195	178	16,5	0,671	0,565	4,54
МТН112-6	5,3	885	0,27	217	19	0,603	0,625	3,1
МТН211-6	832	900	0,46	257	23	0,456	0,666	2,18
МТН311-6	13	925	0,9	186	51	0,124	0,241	4,2
МТН312-6	17,5	945	1,25	233	54	0,125	0,254	2,66
МТН311-8	9	675	1,1	264	26	0,498	0,643	2,07
МТН312-8	13	690	1,25	178	53	0,13	0,1825	4,54
МТН411-6	27	950	2	247	77	0,08	0,233	2,37
МТН412-6	36	955	2,7	274	88	0,059	0,173	1,96
МТН411-8	18	695	2,15	221	59	0,125	0,245	2,96
МТН412-8	26	710	3	266	68	0,102	0,231	2,03
МТН511-8	34	695	4,3	297	81	0,124	0,448	1,645
МТН512-8	45	695	5,7	319	94	0,091	0,356	1,415
МТН611-10	53	560	17	197	185	0,0274	0,176	3,72
МТН612-10	70	560	21	262	181	0,033	0,133	2,1
МТН613-10	90	570	25	339	179	0,0384	0,0988	1,26
МТН711-10	125	580	41	288	294	0,017	0,077	1,74
МТН712-10	155	580	51	345	295	0,0189	0,091	1,21
МТН713-10	200	582	60	431	305	0,021	0,109	0,78

## Приложение 3

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором  
 типа МТМ ( $U_{1л} = 380 \text{ В}$ ;  $U_{1ф} = 220 \text{ В}$ ; 50 Гц; ПВ, % = 40)

Тип	$P_n$ , кВт	$\frac{n_n}{\text{об}} / \text{мин}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	Статор					
				$\cos\varphi$		$I_{1н}$ , А	$I_0$ , А	$R_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом
				ном.	х.х.				
МТМ111-6	2,2	885	2,3	0,76	0,13	6,6	4,6	4,33	2,61
МТМ112-6	3,5	895	2,3	0,75	0,13	9,5	7,25	2,8	1,67
МТМ211-6	5	920	2,5	0,75	0,1	13,6	9,7	1,41	1,29
МТМ311-6	7,5	945	2,5	0,73	0,095	20	14,2	0,9	0,663
МТМ311-8	5	685	2,5	0,73	0,12	14,7	10,2	1,76	1,24
МТМ312-8	11	950	2,8	0,76	0,09	27,3	17,8	0,595	0,485
МТМ312-8	7,5	695	2,5	0,74	0,105	20,6	13,9	1,04	0,833
МТМ411-6	16	957	2,8	0,78	0,075	38	21,4	0,323	0,398
МТМ411-8	11	710	2,8	0,7	0,085	30	21	0,465	0,543
МТМ412-6	22	960	2,8	0,8	0,07	48,5	24,2	0,218	0,312
МТМ412-8	16	715	2,8	0,7	0,08	42,5	30	0,316	0,371
МТМ511-8	22	715	2,8	0,736	0,07	55	37	0,205	0,284
МТМ512-8	30	716	2,8	0,73	0,07	72	46	0,141	0,214
МТМ611-10	38	577	3,0	0,75	0,07	90	57	0,119	0,222
МТМ612-10	50	577	2,8	0,77	0,06	114	66	0,088	0,176
МТМ613-10	63	580	2,9	0,74	0,06	140	80	0,061	0,14
МТМ711-10	80	585	2,7	0,73	0,05	188	115	0,033	0,122
МТМ712-10	100	587	2,8	0,7	0,05	240	150	0,022	0,094
МТМ713-10	125	587	2,9	0,75	0,04	275	156	0,018	0,081

### Окончание прил. 3

Тип	$P_H,$ кВт	$n_H,$ $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	$J_{\text{дв}},$ кг·м <sup>2</sup>	Ротор				
				$E_{2H},$ В	$I_{2H},$ А	$R_2,$ Ом	$X_{2\sigma},$ Ом	$k_e,$ о. е.
МТМ111-6	2,2	885	0,0487	144	11,1	0,72	0,595	2,5
МТМ112-6	3,5	895	0,0675	177	13,5	0,725	0,595	2,02
МТМ211-6	5	920	0,115	215	16,2	0,58	0,66	1,76
МТМ311-6	7,5	945	0,225	240	19,7	0,35	0,511	1,51
МТМ311-8	5	685	0,275	215	17	0,517	0,664	1,67
МТМ312-8	11	950	0,312	166	43	0,097	0,181	2,2
МТМ312-8	7,5	695	0,387	254	20	0,0462	0,641	1,41
МТМ411-6	16	957	0,5	200	53	0,092	0,235	1,8
МТМ411-8	11	710	0,537	172	41,5	0,116	0,214	2,1
МТМ412-6	22	960	0,675	225	63	0,072	0,225	1,63
МТМ412-8	16	715	0,75	200	52	0,098	0,195	1,82
МТМ511-8	22	715	1,025	237	58	0,106	0,231	1,53
МТМ512-8	30	716	1,4	288	65	0,102	0,252	1,26
МТМ611-10	38	577	4,25	172	138	0,0255	0,0463	2,085
МТМ612-10	50	577	5,25	223	140	0,0313	0,0625	1,5
МТМ613-10	63	580	6,25	282	139	0,0366	0,078	1,28
МТМ711-10	80	585	10,25	246	200	0,0159	0,067	1,45
МТМ712-10	100	587	12,75	316	196	0,018	0,082	1,13
МТМ713-10	125	587	15	372	196	0,02	0,098	0,302



## Приложение 4

Технические данные асинхронных двигателей с фазным ротором  
типа МТФ ( $U_{1л} = 380 \text{ В}$ ;  $U_{1ф} = 220 \text{ В}$ ; 50 Гц; ПВ % = 25)

Тип	$P_n$ , кВт	$\frac{n_n, \text{об}}{\text{мин}}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	Статор					
				$\cos\phi$		$I_{1н}$ , А	$I_0$ , А	$R_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом
				ном.	х.х.				
МТФ011-6	1,7	850	2	0,72	0,166	5,9	4,9	5,78	3,6
МТФ012-6	2,7	840	1,9	0,74	0,14	8,9	6,12	3,63	2,51
МТФ111-6	4,1	870	1,9	0,79	0,108	11,7	7,45	2,1	1,93
МТФ112-6	5,8	915	2,4	0,74	0,105	16	11,35	1,26	1,26
МТФ211-6	9	915	2,1	0,74	0,085	24	14,35	0,755	1,05
МТФ311-6	13	935	2,5	0,74	0,093	34,5	23,2	0,48	0,645
МТФ312-6	17,5	950	2,4	0,77	0,085	42,5	28,7	0,23	0,334
МТФ311-8	9	680	2,0	0,74	0,108	25,6	17,7	0,835	0,843
МТФ312-8	13	695	2,5	0,76	0,081	34	24,2	0,365	0,53
МТФ411-6	27	955	3	0,77	0,077	64	40	0,197	0,287
МТФ412-6	36	965	3	0,75	0,069	86	51,8	0,124	0,197
МТФ411-8	18	700	2,5	0,73	0,083	46,7	29,8	0,327	0,53
МТФ412-8	26	715	2,5	0,68	0,08	71	49,6	0,182	0,313

Окончание прил. 4

Тип	$P_n$ , кВт	$\frac{n_n, \text{об}}{\text{мин}}$	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	Ротор				
				$E_{2н}$ , В	$I_{2н}$ , А	$R_2$ , Ом	$X_{2\sigma}$ , Ом	$k_e$ , о.е.
МТФ011-6	1,7	850	0,085	126	12	0,77	0,566	9,06
МТФ012-6	2,7	840	0,115	154	15	0,745	0,59	6,06
МТФ111-6	4,1	870	0,195	175	18,7	0,6	0,57	4,65
МТФ112-6	5,8	915	0,27	217	19	0,5	0,648	3,1
МТФ211-6	9	915	0,46	273	25	0,485	0,855	1,92
МТФ311-6	13	935	0,9	184	51	0,111	0,241	4,2
МТФ312-6	17,5	950	1,25	233	54	0,107	0,244	2,66
МТФ311-8	9	680	1,1	264	26	0,46	0,643	2,07
МТФ312-8	13	695	1,55	178	53	0,122	0,182	4,54
МТФ411-6	27	955	2	246	77	0,076	0,236	2,37
МТФ412-6	36	965	2,7	271	88	0,055	0,173	1,96
МТФ411-8	18	700	2,15	221	59	0,117	0,26	2,94
МТФ412-8	26	715	3	226	68	0,095	0,231	2,03

## Приложение 5

Технические данные двигателей серии 4А с фазным ротором 4АК, 4АНК

$U_{1л} = 380 \text{ В}; U_{1ф} = 220 \text{ В}; 50 \text{ Гц}; \text{ПВ, \%} = 100$

Тип	$P_{\text{н}},$ кВт	$s_{\text{н}},$ о. е.	КПД, о. е.	$\cos\varphi_{\text{н}},$ о. е.	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}},$ о. е.	$I_{2\text{н}},$ А	$E_{2\text{н}},$ В	$J_{\text{дв}},$ кг·м <sup>2</sup>
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АК160S4У3	11	0,05	0,865	0,86	3	22	305	0,125
4АК160М4У3	14	0,04	0,885	0,87	3,5	29	300	0,163
4АК180М4У3	18	0,035	0,89	0,88	4	38	295	0,288
4АК200М4У3	22	0,025	0,90	0,87	4	45	340	0,463
4АК200L4У3	30	0,025	0,905	0,87	4	55	350	0,563
4АК225М4У3	37	0,035	0,90	0,87	3	160	160	0,8
4АК250SA4У3	45	0,03	0,91	0,88	3	170	230	1,25
4АК250SB4У3	55	0,03	0,905	0,9	3	170	200	1,37
4АК250М4У3	71	0,025	0,915	0,86	3	170	250	1,5
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4АК160S6У3	7,5	0,05	0,825	0,77	3,5	18	300	0,175
4АК160М6У3	10	0,045	0,845	0,76	3,8	20	310	0,225
4АК180М6У3	13	0,045	0,855	0,8	4	25	325	0,275
4АК200М6У3	18,5	0,035	0,88	0,81	3,5	35	360	0,5
4АК200L6У3	22	0,035	0,88	0,8	3,5	45	330	0,563
4АК225М6У3	30	0,035	0,89	0,85	2,5	150	140	0,925
4АК250S6У3	37	0,035	0,89	0,84	2,5	165	150	1,5
4АК250М6У3	45	0,03	0,905	0,87	2,5	160	180	1,625
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4АК160S8У3	5,5	0,065	0,8	0,7	2,5	14	300	0,175
4АК160М8У3	7,5	0,06	0,82	0,7	3	16	290	0,225
4АК180М8У3	11,5	0,04	0,855	0,72	3,5	25	270	0,313
4АК200М8У3	15	0,035	0,86	0,7	3	28	360	0,5
4АК200L8У3	18,5	0,035	0,86	0,73	3	40	300	0,565
4АК225М8У3	22	0,045	0,87	0,82	2,2	140	102	0,925
4АК250S6У3	30	0,04	0,885	0,81	2,2	155	125	1,5
4АК250М6У3	37	0,035	0,89	0,8	2,2	155	148	1,75
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АНК160S4У3	14	0,05	0,865	0,85	3	27	330	0,13
4АНК160М4У3	17	0,05	0,88	0,87	3,5	34	315	0,17
4АНК180S4У3	22	0,055	0,87	0,86	3,2	43	300	0,247
4АНК180М4У3	30	0,045	0,88	0,81	3,2	63	290	0,3
4АНК200М4У3	37	0,03	0,90	0,88	3	62	360	0,48
4АНК200L4У3	45	0,035	0,90	0,88	3	75	375	0,585
4АНК225М4У3	55	0,04	0,895	0,87	2,5	200	170	0,832
4АНК250SA4У3	75	0,045	0,90	0,88	2,3	250	180	1,3
4АНК250SB4У3	90	0,04	0,915	0,87	2,5	260	220	1,43

Окончание прил. 5

Тип	$P_H$ , кВт	$s_H$ , о. е.	КПД, о. е.	$\cos\varphi_H$ , о. е.	$\frac{M_{\max}}{M_H}$ , о. е.	$I_{2H}$ , А	$E_{2H}$ , В	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4АНК250М4У3	110	0,035	0,92	0,9	2,5	260	250	1,56
4АНК280S4У3	132	0,029	0,92	0,88	2	330	251	2,99
4АНК280М4У3	160	0,026	0,925	0,88	2	330	300	3,25
4АНК315S4У3	200	0,025	0,93	0,89	2	396	312	4,0
4АНК315М4У3	250	0,025	0,93	0,9	2	425	360	4,68
4АНК355S4У3	315	0,022	0,935	0,9	2	460	420	7,8
4АНК355М4У3	400	0,02	0,94	0,9	2	485	505	9,1
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4АНК180S6У3	13	0,07	0,835	0,81	3	42	205	0,234
4АНК180М6У3	17	0,06	0,85	0,82	3	32,5	335	0,286
4АНК200М6У3	22	0,035	0,88	0,81	3	37	380	0,52
4АНК200L6У3	30	0,04	0,885	0,82	3	46	375	0,585
4АНК225М6У3	37	0,04	0,89	0,86	1,9	180	140	0,962
4АНК250SA6У3	45	0,04	0,895	0,86	2,3	200	155	1,56
4АНК250SB6У3	55	0,035	0,91	0,88	2,5	185	190	0,69
4АНК250М6У3	75	0,03	0,915	0,85	2,5	200	250	1,82
4АНК280S6У3	90	0,036	0,90	0,88	1,9	277	202	3,77
4АНК280М6У3	110	0,036	0,915	0,87	1,9	297	230	4,42
4АНК315S6У3	132	0,03	0,92	0,88	1,9	320	257	5,20
4АНК315М6У3	160	0,03	0,925	0,88	1,9	352	291	5,85
4АНК355S6У3	200	0,025	0,93	0,89	1,8	411	304	9,45
4АНК355М6У3	250	0,025	0,93	0,89	1,8	401	380	11,4
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4АНК180S8У3	11	0,05	0,85	0,72	3,2	22,5	315	0,234
4АНК180М8У3	14	0,045	0,865	0,69	3,5	28	310	0,325
4АНК200М8У3	18,5	0,045	0,86	0,78	2,5	30	380	0,52
4АНК200L8У3	22	0,045	0,87	0,79	2,5	40	330	0,585
4АНК225М8У3	30	0,05	0,865	0,8	1,8	165	120	0,96
4АНК250SA8У3	37	0,055	0,875	0,8	2,2	190	115	1,56
4АНК250SB8У3	45	0,04	0,89	0,82	2,2	190	140	1,63
4АНК250М8У3	55	0,035	0,895	0,83	2,2	185	190	1,82
4АНК280S8У3	75	0,04	0,905	0,84	1,9	257	190	4,16
4АНК280М8У3	90	0,04	0,905	0,84	1,9	267	214	5,33
4АНК315S8У3	110	0,035	0,915	0,84	1,9	311	225	6,37
4АНК315М8У3	132	0,035	0,92	0,84	1,9	364	247	7,54
4АНК355S8У3	160	0,027	0,925	0,86	1,7	353	285	11,7
4АНК355М8У3	290	0,027	0,925	0,86	1,7	359	350	13,0
Синхронная частота вращения 600 об/мин								
4АНК280S10У3	45	0,05	0,89	0,78	1,8	178	162	4,68
4АНК280М10У3	55	0,045	0,895	0,79	1,8	180	185	4,94
4АНК315S10У3	75	0,045	0,90	0,8	1,8	221	217	6,76

## Приложение 6

**Технические данные краново-металлургических двигателей  
постоянного тока независимого возбуждения серии МП и ДП 220 В,  
ПВ = 25 %, исполнение закрытое с естественным охлаждением  
( $U_H = 220$  В)**

Тип	$P_H$ , кВт	$n_H$ , об/ мин	$I_H$ , А	$R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}$ при 15 °С, Ом	$J_{\text{дв}}$ , кг·м <sup>2</sup>
МП-12	2,5	1300	14,2	1,33	0,05
МП-22	4,5	1100	26	0,87	0,155
МП-32	9	900	48	0,348	0,305
МП-41	12	685	64	0,243	0,775
МП-42	16	700	84	0,168	0,95
МП-51	23	600	120	0,0845	2,35
МП-52	33	650	168	0,0495	3,03
МП-62	46	580	231	0,033	5,5
МП-72	75	520	374	0,0133	14
МП-82	100	475	500	0,01045	25,3
МП-82А	130	600	640	0,00685	25,3
ДП-12	3	1200	17,5	1,43	0,05
ДП-21	4,5	1050	26	0,94	0,125
ДП-22	6	1130	33	0,566	0,155
ДП-31	8,5	870	47	0,423	0,3
ДП-32	12	790	65	0,266	0,425
ДП-41	16	710	85	0,177	0,8
ДП-42	21	660	110	0,1155	1,05
ДП-52	32	760	164	0,0545	1,87
ДП-62	46	625	233	0,0332	4,0
ДП-72	67	590	338	0,0204	8,25
ДП-82	95	500	470	0,0117	17,0
ДП-92	135	470	670	0,00745	32,5
Быстроходное исполнение					
ДП-21	5,5	1470	31,5	0,072	0,125
ДП-22	8	1400	45	0,067	0,155
ДП-31	12	1310	65	0,029	0,30
ДП-32	16	1140	85	0,018	0,425
ДП-41	23	1120	120	0,0125	0,8
ДП-42	32	1000	165	0,011	1,05
ДП-52	42	970	214	0,006	1,87
ДП-82А	115	630	580	0,0025	17,0
ДП-92А	140	600	700	0,0025	17,0

## Приложение 7

### Технические данные краново-металлургических двигателей постоянного тока независимого возбуждения серии Д, ПВ = 40 %, исполнение закрытое с естественным охлаждением

Тип	$P_n$ , кВт	$\frac{n_n}{\text{об}} / \text{мин}$	$I_n$ , А	$R_{\text{я}} + R_{\text{дп}}$ при 15 °С, Ом	$J_{\text{дв}}$ , кг · м <sup>2</sup>
Тихоходные, напряжение 220 В					
Д12	2,4	1230	14	1,63	0,05
Д21	3,6	1080	20,5	0,95	0,125
Д22	4,8	1150	26	0,57	0,155
Д31	6,8	880	37	0,42	0,3
Д32	9,5	800	51	0,28	0,43
Д41	13,0	720	69,5	0,17	0,8
Д806	16,0	710	84	0,1085	1
Д808	22	630	112	0,054	2
Д810	29	600	148	0,0356	3,63
Д812	38	565	192	0,023	7
Д814	55	560	280	0,0805	10,25
Д816	70	535	350	0,084	16,25
Д818	83	470	415	0,0066	27,5
Быстроходные, напряжение 220 В					
Д21	4,4	1500	24,5	0,531	0,125
Д22	6,5	1570	34	0,322	0,155
Д31	9,5	1420	50,5	0,194	0,3
Д32	13,0	1240	68	0,125	0,425
Д41	17,5	1160	90,5	0,072	0,8
Д806	21,0	1060	110	0,047	1,0
Д808	26,0	825	134	0,0295	2,0
Тихоходные, напряжение 440 В					
Д21	3,1	1300	9,5	3,54	0,125
Д31	5,2	910	14,5	2,08	0,3
Д41	12,5	720	34	0,695	0,8
Д808	22,0	630	56	0,210	2
Д810	29,0	600	74	0,146	3,63
Д812	36,0	570	92	0,099	7
Д816	70,0	540	175	0,0324	16,25
Д818	83,0	470	205	0,026	27,5
Быстроходные, напряжение 440 В					
Д22	5,6	1550	15,5	1,69	1,69
Д32	12,0	1240	31,5	0,534	0,534
Д806	21,0	1060	55	0,205	0,205

Окончание прил. 7

Тип	$P_n$ , кВт	$\frac{n_n}{об}$ мин	$I_n$ , А	$R_{я} + R_{дп}$ при 15 °С, Ом	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>
Тихоходные, напряжение 220 В					
Д12	2,4	1230	14	1,63	0,05
Д21	3,6	1080	20,5	0,95	0,125
Д22	4,8	1150	26	0,57	0,155
Д31	6,8	880	37	0,42	0,3
Д32	9,5	800	51	0,28	0,43
Д41	13,0	720	69,5	0,17	0,8
Д806	16,0	710	84	0,1085	1
Д808	22	630	112	0,054	2
Д810	29	600	148	0,0356	3,63
Д812	38	565	192	0,023	7
Д814	55	560	280	0,0805	10,25
Д816	70	535	350	0,084	16,25
Д818	83	470	415	0,0066	27,5
Быстроходные, напряжение 220 В					
Д21	4,4	1500	24,5	0,531	0,125
Д22	6,5	1570	34	0,322	0,155
Д31	9,5	1420	50,5	0,194	0,3
Д32	13,0	1240	68	0,125	0,425
Д41	17,5	1160	90,5	0,072	0,8
Д806	21,0	1060	110	0,047	1,0
Д808	26,0	825	134	0,0295	2,0
Тихоходные, напряжение 440 В					
Д21	3,1	1300	9,5	3,54	0,125
Д31	5,2	910	14,5	2,08	0,3
Д41	12,5	720	34	0,695	0,8
Д808	22,0	630	56	0,210	2
Д810	29,0	600	74	0,146	3,63
Д812	36,0	570	92	0,099	7
Д816	70,0	540	175	0,0324	16,25
Д818	83,0	470	205	0,026	27,5
Быстроходные, напряжение 440 В					
Д22	5,6	1550	15,5	1,69	1,69
Д32	12,0	1240	31,5	0,534	0,534
Д806	21,0	1060	55	0,205	0,205

## Приложение 8

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Энергетический институт  
Кафедра электропривода и электрооборудования

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Курсовая работа

Студент гр. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ И.О. Фамилия  
подпись

\_\_\_\_\_ дата

Руководитель

\_\_\_\_\_ должность, ученая степень

\_\_\_\_\_ И.О. Фамилия

\_\_\_\_\_ дата

Томск – 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>3</b>
<b>2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....</b>	<b>4</b>
<b>3. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ДОКУМЕНТА.....</b>	<b>6</b>
<b>4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.....</b>	<b>8</b>
<b>4.1. Расчет моментов нагрузки и моментов инерции         производственного механизма .....</b>	<b>8</b>
<b>4.2. Выбор типа электропривода.....</b>	<b>9</b>
<b>4.3. Предварительный выбор двигателя по мощности .....</b>	<b>10</b>
<b>4.4. Определение параметров двигателя по каталожным данным.....</b>	<b>13</b>
4.4.1. Определение параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения .....	13
4.4.2. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным.....	15
4.4.3. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным .....	17
<b>4.5. Расчет естественных механических и электромеханических         характеристик электродвигателей.....</b>	<b>23</b>
4.5.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения .....	23
4.5.2. Асинхронный двигатель .....	26
<b>4.6. Расчет основных элементов силовых цепей электропривода.....</b>	<b>33</b>
4.6.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения .....	33
4.6.2. Асинхронный двигатель .....	37
<b>4.7. Тормозные режимы работы электроприводов .....</b>	<b>41</b>
4.7.1. Динамическое торможение электрических машин постоянного тока ..	41
4.7.2. Динамическое торможение асинхронного двигателя .....	43
<b>4.8. Расчет переходных процессов         и нагрузочных диаграмм электропривода .....</b>	<b>48</b>
4.8.1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения .....	48
4.8.2. Асинхронный двигатель .....	50
<b>4.9. Проверка двигателя по нагреву и перегрузке.....</b>	<b>52</b>
<b>4.10. Разработка схемы управления электроприводом .....</b>	<b>53</b>
4.10.1. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу скорости .....	55
4.10.2. Управление пуском двигателя постоянного тока по принципу времени .....	56
<b>5. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....</b>	<b>59</b>
<b>6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....</b>	<b>60</b>



<b>7. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.....</b>	<b>62</b>
7.1. Выбор типа электропривода.....	63
7.2. Построение диаграмм производственного механизма .....	63
7.3. Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу.....	65
7.4. Построение электромеханических характеристик электродвигателя.....	70
7.5. Расчет переходных процессов.....	81
7.6. Проверка двигателя по нагреву и перегрузке.....	98
7.7. Схема управления электроприводом.....	100
<b>8. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ.....</b>	<b>104</b>
8.1. Выбор типа электропривода.....	105
8.2. Построение диаграмм производственного механизма .....	105
8.3. Расчет мощности электродвигателя и выбор его по каталогу.....	106
8.4. Построение естественных механической и электромеханических характеристик электродвигателя .....	112
8.5. Расчет пусковых и регулировочных резисторов электропривода .....	116
8.6. Расчет переходных процессов скорости, момента и тока за цикл работы электропривода.....	129
8.7. Проверка двигателя по нагреву и перегрузке.....	140
8.8. Схема управления электроприводом.....	142
<b>9. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>146</b>
<b>Приложение 1. ПРИМЕР РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ МАТНСАД.....</b>	<b>147</b>
<b>Приложение 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ТИПА МТ, МТВ, МТН .....</b>	<b>149</b>
<b>Приложение 3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ТИПА МТМ.....</b>	<b>151</b>
<b>Приложение 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ТИПА МТФ .....</b>	<b>153</b>
<b>Приложение 5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А С ФАЗНЫМ РОТОРОМ 4АК, 4АНК.....</b>	<b>154</b>
<b>Приложение 6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КРАНОВО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СЕРИИ МП И ДП.....</b>	<b>156</b>
<b>Приложение 7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КРАНОВО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ СЕРИИ Д.....</b>	<b>157</b>
<b>Приложение 8. ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ.....</b>	<b>159</b>

Учебное издание

КАЧИН Сергей Ильич  
ЧЕРНЫШЕВ Александр Юрьевич  
КАЧИН Олег Сергеевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ  
ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Учебно-методическое пособие

Научный редактор  
*доктор технических наук, профессор Р.Ф. Бекишев*